

Titre: Caractérisation des secousses sismiques typiques de l'Est canadien
Title:

Auteur: Benjamin Blasco
Author:

Date: 2009

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Blasco, B. (2009). Caractérisation des secousses sismiques typiques de l'Est canadien [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/194/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/194/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Najib Bouaanani
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DES SECOUSSES
SISMQUES TYPIQUES DE L'EST CANADIEN

BENJAMIN BLASCO
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
AOÛT 2009

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

CARACTÉRISATION DES SECOUSSES
SISMIQUES TYPIQUES DE L'EST CANADIEN

présenté par: BLASCO Benjamin

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. LÉGER Pierre, Ph.D., président

M. BOUAANANI Najib, Ph.D., membre et directeur de recherche

Mme KOBOEVIC Sanda, Ph.D., membre

DÉDICACE

À Laure,

À ma famille,

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'ensemble du Groupe de Recherche en génie des Structures (GRS) et les personnes qui ont aidé, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire de Maîtrise. Je pense en particulier aux personnes suivantes :

- Le professeur Najib Bouaanani, mon directeur de recherche, qui m'a épaulé tout au long de mon travail et a su, par ses conseils et attentions, me donner goût à la recherche et à l'enseignement.
- Les professeurs Pierre Léger et Sanda Kobojevic qui ont respectivement accepté d'être président et membre de mon jury de mémoire.
- L'ensemble des professeurs du département des génies Civil, Géologique et des Mines (CGM) de l'École Polytechnique de Montréal pour leurs enseignements de qualité et leur entière dévotion à l'apprentissage.
- Mes professeurs de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État pour leurs enseignements de 1^{re} et 2^{me} année d'école d'ingénieur.
- Mes camarades de bureau qui ont fait régner une bonne ambiance de travail favorisant l'entre-aide et la concentration.
- Les stagiaires ayant contribué au traitement numérique et la génération des bases de données. Je pense en particulier à Valentine Bayle, Andrée-Anne Caron-Boivert, Alexis Lefrançois, Robin Lehoux-Audet et à l'étudiant en maîtrise Yazan Ajib.
- Mme Anne Marie Goulet, Mme Lilia Paquin et Mme Manon Latour, respectivement secrétaire du GRS, du CGM au premier cycle et du CGM au cycle supérieur qui m'ont aidé pour les formalités administratives.
- M. Lionel Royer du service administratif de l'ENTPE qui m'a suivi efficacement tout au long de mon programme d'échange universitaire au Canada.
- Ma fiancée, Laure, qui m'a soutenu, encouragé et aidé tout au long de ma recherche.
- Ma famille qui, même éloignée, a su m'épauler pendant ces deux années.
- Mon beau-père Benoit, qui m'a aidé à relire ce mémoire.
- Mes amis du Québec avec qui j'ai voyagé dans cette belle province.

Je tiens aussi à remercier l'École Polytechnique de Montréal (EPM) pour la qualité de son accueil, pour la beauté et la propreté de ses locaux, pour le suivi administratif de très bonne qualité et pour l'ambiance générale de cette grande école. Je remercie l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) pour la qualité de son enseignement et pour m'avoir offert la chance de faire un double cursus à l'étranger.

Je n'oublie pas tous mes professeurs de l'ENTPE et de l'EPM que je remercie de m'avoir fait partager leur savoir et leurs expériences si précieux.

Je remercie enfin tous les employés de l'administration, du Bureau des Affaires Académiques, de la reprographie, de la sécurité, du service informatique et du restaurant de nos deux écoles pour leur sympathie et leur bonne humeur.

RÉSUMÉ

Bien que situé en plein centre d'une plaque tectonique, le Nord-est du continent américain ressent assez fréquemment des secousses sismiques de magnitude significative. Le risque sismique de ce territoire est relativement important compte tenu de sa forte densité de population. Les données sismiques historiques de cette région sont peu nombreuses et le mécanisme sismo-tectonique de ces secousses intra-plaques sont de nos jours relativement mal connus. Malgré ce contexte, les ingénieurs en structure tentent de dimensionner au mieux des infrastructures sécuritaires et économiques.

Ce projet de maîtrise s'intéresse à la caractérisation des secousses sismiques du Nord-est Américain et de leurs effets sur les structures. Les deux objectifs premiers de cette recherche sont de : (i) de déterminer et de caractériser des spectres de réponses linéaires et non-linéaires des séismes historiques et synthétiques typiques de l'Est et de l'Ouest Nord Américain, (ii) de proposer des applications possibles pour l'ingénieur.

Ce mémoire présente d'abord une revue de littérature couvrant l'état de l'art actuel dans le domaine du génie parasismique. On s'intéresse ensuite au calcul et à la caractérisation des spectres linéaires et non-linéaires de réponse en fonction de leur situation géographique, i.e. Est vs. Ouest. Une étude approfondie sur la caractérisation du facteur de réduction de la force sismique est également présentée. Enfin, on expose quelques applications potentielles des résultats de cette recherche dans les domaines de la sismologie de l'ingénieur et du dimensionnement performant des structures.

Cette recherche a nécessité le développement d'outils de calcul de spectre fiables et modulables. Un algorithme numérique efficace permettant le calcul des spectres inélastiques à ductilité constante est présenté et illustré dans ce mémoire. Une large base de données spectrales d'enregistrements historiques et synthétiques typiques de l'Amérique du Nord a été construite afin de mener des analyses statistiques visant à caractériser ces secousses. On confirme tout d'abord que les spectres de l'Est ont un contenu fréquentiel bien plus

élevé que ceux de l'Ouest. On quantifie, dans un deuxième temps, les effets de la décorrélation stochastique des signaux sismiques sur les spectres de réponse. On remarque que le passage au repère principal a tendance à décorréler les spectres horizontaux et à diminuer le spectre vertical. On étudie ensuite les rapports d'amplitude de spectre entre chaque direction (rapports horizontal et vertical). On constate une grande variation de ces paramètres en fonction de la période de vibration. On relève également de nettes différences entre l'Est et l'Ouest d'une part, et entre les données historiques et synthétiques d'autre part. Les rapports d'amplitude à l'Est sont notamment plus importants qu'à l'Ouest surtout pour la direction verticale.

On étudie aussi le facteur de réduction de la force sismique (R) et l'on montre qu'il dépend de la situation géographique, de la magnitude, du sol et de la rigidité post-élastique. En se basant sur ces résultats, on développe des relations originales entre la résistance (R), la ductilité en déplacement (μ) et la période (T), couramment désignées par les relations R - μ - T . Ces relations ont été calibrées en utilisant une large base de données également décrite dans ce mémoire. On présente enfin des applications potentielles pour l'ingénieur grâce aux résultats de ces travaux. De nouvelles directions pour des recherches futures sont également suggérées.

ABSTRACT

Eastern North America (ENA) often experienced significant earthquakes although located in an intraplate tectonic environment. The seismic risk in this region remains fairly high because of its high population density. Only few historical seismic data from this region is available and the mechanisms that caused these seismo-tectonic events are still not well understood. In spite of this context, civil engineers devote their efforts to design safer and more economical structures.

This report aims at characterizing ground motions typical of eastern North America and their effects on structures. The main two objectives of this study are : (i) to compile and characterize a large database of linear and non-linear response spectra of historical and synthetic accelerograms typical of Eastern and Western North America (WNA), and (ii) propose possible engineering applications of the characterization studies conducted.

The report presents a comprehensive literature review addressing the state of the art in earthquake engineering. The computation of the linear and non-linear response spectra of a large database of earthquakes and their characterization depending on geographic location, i.e. East vs. West is conducted. A detailed study on seismic strength reduction factor is also carried out. Finally, possible engineering applications of this research for engineering seismology and performed-based design are discussed.

This research required the development of several reliable and modular numerical tools. A efficient algorithm to compute constant ductility inelastic spectra is presented and illustrated in this report. A large database of response spectra of historical and synthetic accelerograms was built and analyzed statistically. We first confirm the higher frequency content in ENA response spectra compared WNA spectra. Furthermore, we quantify the effect of stochastic uncorrelation of the ground motions on their response spectra, and the related amplitude ratios between each earthquake component (horizontal and vertical ratios). This study highlights a large variation of these parameters depending of the period

and distinct differences between Eastern and Western Nord America as well as between between historical and synthetic data.

We also studied the seismic strength reduction factor (R) and we characterized its dependence on geographic location, magnitude, soil type and material post-hardening. Based on these results, an original R - μ - T relationships relating the strength (R), the ductility (μ) and the period (T) is developed. These relationships were calibrated using the database of ENA and WNA ground motions described previously. Finally, the thesis presents several possible engineering applications of this research and suggests new directions for future research.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES TABLEAUXxxvi
LISTE DES ANNEXES	xxix
LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES	xxx
 CHAPITRE 1 INTRODUCTION	 1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique	2
1.3 Objectifs	2
1.4 Méthodologie	3
1.5 Plan du mémoire	4
 CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	 6
2.1 Introduction	6
2.2 Origine et nature des mouvements sismotectoniques	7
2.2.1 Origine des séismes	7
2.2.2 Nature du phénomène	8
2.3 Caractérisation des secousses	13
2.3.1 Caractéristiques du signal	13

2.3.2	Les échelles de magnitude	15
2.4	Contexte sismique au Canada	18
2.4.1	Les zones sismiques du Canada	18
2.4.2	La particularité de l'Est Canadien	20
2.4.3	Séismes historiques du continent Nord Américain à l'étude	22
2.4.4	Séismes artificiels du continent Nord Américain à l'étude	24
2.4.4.1	Données de 1999	25
2.4.4.2	Données de 2009	26
2.5	Décorrélacion stochastique de signaux sismiques	27
2.5.1	Matrice d'intensité quadratique	27
2.5.2	Repère principal	28
2.5.3	Effet de la décorrélacion sur les accélérogrammes	31
2.6	Spectres de réponse	33
2.6.1	Définition d'un spectre de réponse élastique	33
2.6.2	Spectres non-linéaires	36
2.7	Les facteurs de réduction de force sismique	42
2.7.1	Rappel de la méthode simplifiée d'analyse sismique du CNBC 2005	42
2.7.2	Le facteur de sur-résistance	44
2.7.3	Le facteur lié à la ductilité	47
2.8	Conclusion	50
CHAPITRE 3 SPECTRES SISMQUES LINÉAIRES		52
3.1	Introduction	52
3.2	Développement d'un outil automatique de calcul de spectre linéaire	52
3.2.1	Principes généraux	52
3.2.2	Exemple d'utilisation	54
3.2.3	Validation de l'outil de calcul	55
3.3	Effet de la décorrélacion sur les spectres linéaires	59
3.3.1	Effet sur les composantes horizontales	59
3.3.2	Effet sur la composante verticale	62

3.3.3	Développement de critère d'influence de la décorrélation	62
3.4	Caractérisation approfondie des spectres élastiques principaux	63
3.4.1	Spectres moyens élastiques en fonction du couple (M, R)	67
3.4.2	Rapports d'amplitude de spectres élastiques horizontaux (RASEH)	79
3.4.3	Rapports d'amplitude de spectres élastiques verticaux (RASEV)	84
3.5	Conclusion	86

CHAPITRE 4 SPECTRES INÉLASTIQUES ET DEMANDES EN DUCTILITÉ 88

4.1	Introduction	88
4.2	Développement d'un module de calcul non-linéaire pour RSPECTRUM	88
4.2.1	Principe général	88
4.2.2	Détail de l'algorithme	89
4.2.3	Validation de l'outils de calcul	91
4.3	Étude approfondie des spectres inélastiques	96
4.3.1	Présentation de la base de données spectrales et des spectres inélastiques moyens	96
4.3.2	Rapports d'amplitude de spectres inélastiques horizontaux (RASIH)	102
4.3.3	Rapports d'amplitude de spectres inélastiques verticaux (RASIV)	113
4.4	Conclusion	118

CHAPITRE 5 FACTEURS DE RÉDUCTION DE LA FORCE SISMIQUE 119

5.1	Introduction	119
5.2	Calcul du facteur de réduction de la force sismique	119
5.3	Facteurs de réduction de force des séismes historiques	120
5.3.1	Les données historiques brutes	120
5.3.2	Les données historiques décorrélées	127
5.4	Résultat des données synthétiques	130
5.4.1	Les données synthétiques brutes	130
5.4.2	Les données synthétiques décorrélées	134
5.5	Étude sur les formules empiriques	139

5.5.1	Comparaison avec les formules de la littérature	139
5.5.2	Développement d'une nouvelle formule	143
5.5.2.1	Caractérisation géographique	143
5.5.2.2	Effet du sol, de la rigidité post-élastique et de la magnitude	148
5.6	Conclusion	164

CHAPITRE 6 APPLICATIONS POSSIBLES AUX STRUCTURES DES OUTILS DE CARACTÉRISATION 170

6.1	Introduction	170
6.2	Spectre de plastification (YPS)	171
6.2.1	Spectres de plastification exacts	171
6.2.2	Spectres de plastification approximatés	174
6.3	Exemple de dimensionnement performant	176
6.3.1	Définitions du dimensionnement performant	176
6.3.2	Méthode de dimensionnement utilisant le YPS	180
6.3.3	Application de la méthode YPS à un exemple	182
6.3.4	Comparaison des résultats	189
6.4	Autres applications	197
6.4.1	Outils de calculs	197
6.4.2	Génération de spectres et accélérogrammes verticaux	198
6.4.2.1	Génération du spectre de réponse vertical	200
6.4.2.2	Procédure de simulation de l'accélérogramme compatible avec le spectre généré	202
6.4.2.3	Quelques résultats et commentaires	204
6.4.3	Effet des secousses multi-directionnelles	205
6.5	Conclusion	207

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS 209

7.1	Introduction	209
7.2	Des outils de calcul performants et modulables	209
7.3	Caractérisation des spectres élastiques et inélastiques	210

7.4	Facteur de réduction de force	211
7.5	Synthèse des résultats et applications	212
7.6	Perspectives de recherche	214
RÉFÉRENCES		215
ANNEXES		221

LISTE DES FIGURES

FIG. 2.1	: Sismicité du globe, magnitude > 5 [Institut de Physique du Globe de Paris].	8
FIG. 2.2	: (a) Théorie élastique de Reid, (b) Mécanisme de rupture des failles terrestres [adapté de Filiatrault 1996].	9
FIG. 2.3	: Représentation de ondes sismiques [Filiatrault 1996].	11
FIG. 2.4	: (a) Bâtiment à l'équilibre. (b) Bâtiment déformé lors d'un séisme.	12
FIG. 2.5	: Zones et Aléa sismique du Canada [adapté de la Commission géologique du Canada 2005].	18
FIG. 2.6	: Contexte tectonique de la côte Pacifique Canadienne [Commission géologique du Canada 2006].	19
FIG. 2.7	: Zone sismique de l'Est Canadien [adapté de Adams et Basham 1989 et de la Commission géologique du Canada 2007].	21
FIG. 2.8	: Dégâts de quelques séismes historiques. (a) Mairie de Montréal Est (Saguenay) [Ressources Naturelles Canada 2009]. (b) Condo de Los Gatos (Loma Prieta) [Martin and Associates 2009]. (c) Échangeur proche de l'épicentre de Northridge [USGS 2009].	24
FIG. 2.9	: Localisation des séismes étudiés.	25
FIG. 2.10	: Repère (x, y, z) de l'enregistrement, Repère principal \mathfrak{R}_p (1, 2, 3) et Repère pseudo-principal \mathfrak{R}' (H_1, H_2, V).	30
FIG. 2.11	: (a) Accélérogrammes bruts de Nahanni (NAH1 Tableau I.1), (b) Accélérogrammes décorrélés de Nahanni (NAH1).	32
FIG. 2.12	: Spectres de déplacement D , de vitesse V et d'accélération A relatifs de la direction x du séisme de Miramichi (MIR1).	35
FIG. 2.13	: Spectre de dimensionnement du code national du bâtiment pour un sol C des villes de Montréal (a) et Vancouver (b) [adapté de Paultre et du CNBC 4.1.8.4 (2005)].	37

FIG. 2.14	: (a) Loi de comportement du système élasto-plastique et de son système linéaire équivalent, (b) Déplacement d'un système non-linéaire soumis au séisme de Miramichi (MIR1) dépendant de \bar{f}_y .	39
FIG. 2.15	: Pseudo-spectre du séisme de Miramichi (MIR1) pour les ductilités $\mu = [1; 1.5; 2; 4; 6; 8]$.	41
FIG. 2.16	: Graphique force-déformation illustrant les facteurs de réduction de force R_0 et R_d . Légende : $_e$ = relatif au système élastique équivalent ; $_y$ = relatif à la plastification et $_f$ = relatif au dimensionnement (pondéré).	46
FIG. 2.17	: Réponse de structures à comportement élastique et élasto-plastique dans le cas de l'hypothèse des déplacements égaux (a) et de l'hypothèse des énergies égales (b).	47
FIG. 3.1	: Système masse-ressort-amortisseur servant au calcul des spectres.	53
FIG. 3.2	: (a) Extrait d'un fichier texte de données de l'accélérogramme (signal.acc), (b) Fichier informatif associé (signal.1fo).	54
FIG. 3.3	: Exemple de fichier à compléter par l'utilisateur pour lancer le programme RSPECTRUM.	55
FIG. 3.4	: Exemple de fichier de commande du logiciel RUAUMOKO pour $T = 0.5\text{ s}$ et $\xi = 5\%$.	56
FIG. 3.5	: Capture d'écran de RSPECTRUM utilisant TCL&TK et RSPEC.	56
FIG. 3.6	: Comparaison avec ADINA des déplacements élastiques calculés par RUAUMOKO et OPENSEES via RSPECTRUM.	57
FIG. 3.7	: Comparaison des pseudo-spectres élastiques calculés par RSPECTRUM avec des logiciels témoins : <i>Légende : bleu = RSPECTRUM ; rouge = SEISMOSIGNAL et vert = BISPEC.</i>	58
FIG. 3.8	: Schématisation des effets de la décorrélation sur les spectres élastiques horizontaux. a) Effet de séparation des spectres, b) Effet d'inversion des directions horizontales : <i>Légende : bleu = direction x ou H_1 et rouge = direction y ou H_2</i>	60

FIG. 3.9	: Comparaison de spectres décorrélés selon 2 directions et 3 directions : <i>Légende : bleu = direction x ou H_1 ; rouge = direction y ou H_2 ; trait continu = spectre brut ou décorrélé 2D ; trait pointillé = spectre décorrélé 3D</i>	61
FIG. 3.10	: Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Est décorrélés.	68
FIG. 3.10	: Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Est décorrélés (suite).	69
FIG. 3.11	: Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Est bruts.	70
FIG. 3.11	: Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Est bruts (suite).	71
FIG. 3.12	: Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Ouest décorrélés.	72
FIG. 3.13	: Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Ouest bruts.	73
FIG. 3.14	: Spectres moyens élastiques des séismes synthétiques de l'Est décorrélés.	75
FIG. 3.15	: Spectres moyens élastiques des séismes synthétiques de l'Est bruts.	76
FIG. 3.16	: Spectres moyens élastiques des séismes synthétiques de l'Ouest décorrélés.	77
FIG. 3.17	: Spectres moyens élastiques des séismes synthétiques de l'Ouest bruts.	78
FIG. 3.18	: Discrétisation du champ des périodes pour le calcul de moyennes.	81
FIG. 3.19	: Rapports moyens d'amplitude spectrale horizontale des données historiques ordonnés selon le couple (M,R) et leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. <i>Légende : bleu = Groupements de l'Est ; orange = Groupements de l'Ouest</i>	82
FIG. 3.20	: Rapports moyens d'amplitude spectrale horizontale des données synthétiques ordonnés selon le couple (M,R) et leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. <i>Légende : bleu = Groupements de l'Est ; orange = Groupements de l'Ouest</i>	83

FIG. 3.21	: Rapports moyens d'amplitude spectrale verticale des données historiques ordonnés selon le couple (M,R) et leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. <i>Légende : bleu = Groupements de l'Est ; orange = Groupements de l'Ouest</i>	85
FIG. 4.1	: (a) Illustration du balayage préliminaire de $\log(\mu) = F(-\log(\bar{f}_y))$, (b) Détail de l'algorithme de convergence par segment.	92
FIG. 4.2	: Comparaison avec ADINA des déplacements inélastiques calculés par RUAUMOKO et OPENSEES via RSPECTRUM avec le module <i>RNonLin</i>	93
FIG. 4.3	: Comparaison des pseudo-spectres inélastiques calculés par RSPECTRUM avec des logiciels témoins : <i>Légende : bleu = RSPECTRUM ; rouge = SEISMOSIGNAL et vert = BISPEC</i>	94
FIG. 4.4	: Diagramme de fonctionnement du programme RSPECTRUM.	95
FIG. 4.5	: Spectres moyens inélastiques des séismes historiques de l'Est décorrés.	98
FIG. 4.6	: Spectres moyens inélastiques des séismes historiques de l'Est bruts.	99
FIG. 4.7	: Spectres moyens inélastiques des séismes historiques de l'Ouest décorrés.	100
FIG. 4.8	: Spectres moyens inélastiques des séismes historiques de l'Ouest bruts.	101
FIG. 4.9	: Spectres moyens inélastiques des séismes synthétiques de l'Est décorrés.	103
FIG. 4.10	: Spectres moyens inélastiques des séismes synthétiques de l'Est bruts.	104
FIG. 4.11	: Spectres moyens inélastiques des séismes synthétiques de l'Ouest décorrés.	105
FIG. 4.12	: Spectres moyens inélastiques des séismes synthétiques de l'Ouest bruts.	106

FIG. 4.13	: Variation des médianes des RASIH normalisées en fonction de la ductilité pour les données historiques et synthétiques et leurs moyennes. <i>Légende : bleu = Données de l'Est; rouge = Données de l'Ouest</i>	108
FIG. 4.14	: RASIH moyens des données historiques pour chaque famille (M, R) et ductilité μ en fonction de la période ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. <i>Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest</i>	109
FIG. 4.15	: RASIH moyens des données synthétiques pour chaque famille (M, R) et ductilité μ en fonction de la période ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. <i>Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest</i>	110
FIG. 4.16	: RASIH moyens des données historiques pour chaque famille (M, R) et classe de période en fonction de la ductilité ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. <i>Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest</i>	111
FIG. 4.17	: RASIH moyens des données synthétiques pour chaque famille (M, R) et classe de période en fonction de la ductilité ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. <i>Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest</i>	112
FIG. 4.18	: Variation des médianes des RASIV normalisées en fonction de la ductilité pour les données historiques et leurs moyennes. <i>Légende : bleu = Données de l'Est; rouge = Données de l'Ouest</i>	114
FIG. 4.19	: RASIV moyens des données historiques pour chaque famille (M, R) et ductilité μ en fonction de la période ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. <i>Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest</i>	116

FIG. 4.20	: RASIV moyens des données historiques pour chaque famille (M, R) et classe de période en fonction de la ductilité ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. <i>Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest</i>	117
FIG. 5.1	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ des données historiques brutes pour la famille 1 de l'Est avec $\mu = 4$. <i>Légende : bleu = composante x; rouge = composante y; vert = composante z; cyan = ν_{xy}; magenta = ν_z</i>	121
FIG. 5.2	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens des données historiques pour les familles 2 et 4 de l'Est pour $\mu = 2$. <i>Légende : bleu = composante x; rouge = composante y; vert = composante z</i>	123
FIG. 5.3	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens des données historiques pour les familles 2 et 4 de l'Est pour $\mu = 6$. <i>Légende : bleu = composante x; rouge = composante y; vert = composante z</i>	124
FIG. 5.4	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens des données historiques pour les familles 1 et 3 de l'Ouest pour $\mu = 2$. <i>Légende : bleu = composante x; rouge = composante y; vert = composante z</i>	125
FIG. 5.5	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens des données historiques pour les familles 1 et 3 de l'Ouest pour $\mu = 6$. <i>Légende : bleu = composante x; rouge = composante y; vert = composante z</i>	126
FIG. 5.6	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens des données historiques brutes pour l'Est et pour l'Ouest. <i>Légende : bleu = $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyen de l'Est; rouge = $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyen de l'Ouest</i>	127
FIG. 5.7	: $\bar{R}\text{-}\mu\text{-}T$ des données historiques décorréliées pour la famille 1 de l'Est avec $\mu = 4$. <i>Légende : bleu = composante horizontale majeure; rouge = composante horizontale mineure; vert = composante verticale; cyan = ν_H; magenta = ν_V</i>	129
FIG. 5.8	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ et $\bar{R}\text{-}\mu\text{-}T$ des données historiques de la famille 5 de l'Est. <i>Légende : bleu = $R\text{-}\mu\text{-}T$; vert = $\bar{R}\text{-}\mu\text{-}T$</i>	130

FIG. 5.9	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ des données synthétiques brutes pour la famille 2 de l'Ouest avec $\mu = 6$. <i>Légende : bleu = composante x ; rouge = composante y ; cyan = ν_{xy}</i>	132
FIG. 5.10	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ des données synthétiques brutes pour la famille 1 de l'Est avec $\mu = 8$. <i>Légende : bleu = composante x ; rouge = composante y ; cyan = ν_{xy}</i>	133
FIG. 5.11	: Comparaison des $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens historiques et synthétiques bruts de l'Est. <i>Légende : cyan = synthétique ; magenta = historique</i> . . .	133
FIG. 5.12	: Comparaison des $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens historiques et synthétiques bruts de l'Ouest. <i>Légende : cyan = synthétique ; magenta = historique</i> . .	134
FIG. 5.13	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens des données synthétiques brutes pour l'Est et pour l'Ouest. <i>Légende : bleu = $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyen de l'Est ; rouge = $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyen de l'Ouest</i>	135
FIG. 5.14	: $\overline{R}\text{-}\mu\text{-}T$ des données synthétiques décorrélées pour la famille 2 de l'Ouest avec $\mu = 6$. <i>Légende : bleu = composante majeure ; rouge = composante mineure ; cyan = ν_H</i>	135
FIG. 5.15	: $\overline{R}\text{-}\mu\text{-}T$ des données synthétiques décorrélées pour la famille 1 de l'Est avec $\mu = 8$. <i>Légende : bleu = composante majeure ; rouge = composante mineure ; cyan = ν_H</i>	136
FIG. 5.16	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ et $\overline{R}\text{-}\mu\text{-}T$ des données synthétiques de la famille 4 de l'Est. <i>Légende : bleu = $R\text{-}\mu\text{-}T$; vert = $\overline{R}\text{-}\mu\text{-}T$</i>	137
FIG. 5.17	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens des données historiques de l'Est comparés avec les formules empiriques de la littérature. <i>Légende : bleu = $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda</i>	140
FIG. 5.18	: $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens des données historiques de l'Ouest comparés avec les formules empiriques de la littérature. <i>Légende : bleu = $R\text{-}\mu\text{-}T$ moyens ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda</i>	140

FIG. 5.19	: R - μ - T moyens des données synthétiques de l'Est comparés avec les formules empiriques de la littérature. <i>Légende : bleu = R-μ-T moyens ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda</i>	141
FIG. 5.20	: R - μ - T moyens des données synthétiques de l'Est comparés avec les formules empiriques de la littérature. <i>Légende : bleu = R-μ-T moyens ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda</i>	142
FIG. 5.21	: Première formule empirique basée sur les données historiques de l'Est pour $\mu = 4$ et 8. <i>Légende : bleu = R-μ-T moyens ; ligne rouge = Formule empirique 1 de ce mémoire ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda</i>	144
FIG. 5.22	: Première formule empirique simple basée sur les données synthétiques de l'Ouest pour $\mu = 4$ et 8. <i>Légende : bleu = R-μ-T moyens ; ligne rouge = Formule empirique 1 de ce mémoire ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda</i>	145
FIG. 5.23	: Principe de calcul de la formule.	146
FIG. 5.24	: Formule empirique finale basée sur les données historiques de l'Est pour $\mu = 4$ et 8. <i>Légende : bleu = R-μ-T moyens ; ligne rouge = Formule empirique 2 de ce mémoire ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda</i> . . .	149
FIG. 5.25	: Formule empirique finale basée sur les données historiques de l'Ouest pour $\mu = 4$ et 8. <i>Légende : bleu = R-μ-T moyens ; ligne rouge = Formule empirique 2 de ce mémoire ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda</i>	150
FIG. 5.26	: Formule empirique finale basée sur les données synthétiques de l'Est pour $\mu = 4$ et 8. <i>Légende : bleu = R-μ-T moyens ; ligne rouge = Formule empirique 2 de ce mémoire ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda</i> . .	151

FIG. 5.27	: Formule empirique finale basée sur les données synthétiques de l'Ouest pour $\mu = 4$ et 8. <i>Légende : bleu = R-μ-T moyens ; ligne rouge = Formule empirique 2 de ce mémoire ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda</i>	152
FIG. 5.28	: R - μ - T moyens des données synthétiques de 2009 pour l'Est et un sol de type A	153
FIG. 5.29	: R - μ - T moyens des données synthétiques de 2009 pour l'Est et un sol de type C	154
FIG. 5.30	: R - μ - T moyens des données synthétiques de 2009 pour l'Ouest et un sol de type D	155
FIG. 5.31	: R - μ - T moyens des données synthétiques de 2009 pour l'Ouest et un sol de type E	156
FIG. 5.32	: Comparaison des formules R - μ - T selon les types de sol pour une rigidité post-élastique nulle	162
FIG. 5.33	: Comparaison des formules R - μ - T selon la rigidité post-élastique pour un sol de type C	163
FIG. 5.34	: Représentation en 3 dimensions de la formule 2009 en fonction de μ et T pour le sol de type A et $\alpha = 0\%$	165
FIG. 5.35	: Représentation en 3 dimensions de la formule 2009 en fonction de α et T pour le sol de type C et une ductilité de 6	165
FIG. 5.36	: Représentation en 3 dimensions de la formule 2009 en fonction de S et T pour $\alpha = 0\%$ et une ductilité de 6	166
FIG. 5.37	: Représentation en 3 dimensions de la formule 2009 en fonction de μ et α pour le sol de type A de l'Est et une magnitude de 6 . . .	167
FIG. 5.38	: Capture d'écran de l'utilitaire de calcul Excel développé dans le cadre de ce projet pour illustrer les relations R - μ - T	168
FIG. 6.1	: Exemple de YPS "exact" pour le séisme SAG1 ENR calculé par RSPECTRUM, USEE et SEISMOSIGNAL	172
FIG. 6.2	: YPS "exact" du séisme IMP ENR détaillé	173

FIG. 6.3	: YPS "approximés" pour les villes de La Malbaie (a) et Vancouver (b)	175
FIG. 6.4	: YPS approximatés inélastiques pour les villes de La Malbaie (a) et Vancouver (b) utilisant différentes formules $R-\mu-T$	177
FIG. 6.5	: YPS approximatés inélastiques pour les villes de La Malbaie (a) et Vancouver (b) utilisant la formule Blasco 2009	178
FIG. 6.6	: YPS exacts et approximatés des villes de Montréal (a) et Québec (b) pour $M_w = 7$	179
FIG. 6.7	: Plan du pont et de la pile à l'étude [adapté des archives du Ministère des Transports du Québec]	183
FIG. 6.8	: Modèle à un degrés de liberté équivalent à la pile de pont étudiée (a), situation déformée à la plastification (b) et à l'ultime (c) . . .	184
FIG. 6.9	: Évolution de la ductilité en fonction de l'élanement du système oscillant	186
FIG. 6.10	: YPS de dimensionnement pour les sites de La Malbaie (a) et de Vancouver (b)	188
FIG. 6.11	: Chargements simplifiés de la pile à 3 colonnes. (a) Répartition de la force équivalente, (b) Déplacement des forces au sommet des colonnes, (c) Moments et charges longitudinales équivalents	190
FIG. 6.12	: Comparaison des YPS de dimensionnement selon la formule $R-\mu-T$ choisie	195
FIG. 6.13	: Capture d'écran de R1-SPECTRUM	197
FIG. 6.14	: Comparaison des spectres radiaux et unidirectionnels du séisme IMP	199
FIG. 6.15	: Principe de réduction et de décalage du spectre horizontal pour calculer le spectre vertical "cible"	201
FIG. 6.16	: Récapitulatif de la procédure de génération de spectres et accélérogrammes verticaux	203
FIG. 6.17	: Spectres verticaux cibles, simulés et réels des séismes NAH1 (a) et IMP (b)	204

FIG. 6.18	: Accélérogrammes verticaux simulés puis permutés et réels des séismes NAH1 (a) et IMP (b)	205
FIG. II.1	: Spectres élastiques bruts et décorrélés de quelque séisme historique de l'Est. <i>Légende : vert = composante z ou V ; bleu = composante x ou H₁ ; rouge = composante y ou H₂</i>	231
FIG. II.2	: Spectres élastiques bruts et décorrélés de quelque séisme historique de l'Ouest. <i>Légende : vert = composante z ou V ; bleu = composante x ou H₁ ; rouge = composante y ou H₂</i>	232
FIG. II.3	: Spectres élastiques bruts et décorrélés de quelque séisme artificiel. <i>Légende : bleu = composante x ou H₁ ; rouge = composante y ou H₂</i>	233
FIG. III.1	: Rapports d'amplitude spectrale des séismes historiques de l'Est. <i>Légende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; vert = ρ_z ou ρ_V ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$</i> 235	
FIG. III.1	: Rapports d'amplitude spectrale des séismes historiques de l'Est (suite). <i>Légende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; vert = ρ_z ou ρ_V ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$</i>	236
FIG. III.1	: Rapports d'amplitude spectrale des séismes historiques de l'Est (suite2). <i>Légende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; vert = ρ_z ou ρ_V ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$</i>	237
FIG. III.2	: Rapports d'amplitude spectrale des séismes historiques de l'Ouest. <i>Légende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; vert = ρ_z ou ρ_V ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$</i> 238	
FIG. III.3	: Rapports d'amplitude spectrale des séismes synthétiques de l'Est. <i>Légende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$</i>	239
FIG. III.3	: Rapports d'amplitude spectrale des séismes synthétiques de l'Est (suite). <i>Légende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$</i>	240
FIG. III.4	: Rapports d'amplitude spectrale des séismes synthétiques de l'Ouest. <i>Légende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$</i>	241
FIG. III.4	: Rapports d'amplitude spectrale des séismes synthétiques de l'Ouest (suite). <i>Légende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$</i>	242

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	: Échelle d'intensité de Mercalli modifiée (I_{MM}) adaptée de Wood, Newman et Filiatrault.	17
Tableau 2.2	: Calcul du facteur de surcapacité pour différents systèmes de résistance aux forces sismiques (SRFS) [Paultre 2009].	45
Tableau 2.3	: Paramètres de régression de Nassar et Krawinkler de l'équation (2.50).	49
Tableau 2.4	: Valeurs de R_d et R_0 utilisées dans le CNB 2005 en fonction du système de résistance aux forces sismiques (SRFS). [Adapté du CAC 2006.]	50
Tableau 3.1	Indices de décorrélation τ_{inv} , τ_h et τ_v pour les séismes historiques.	64
Tableau 3.2	Indices de décorrélation τ_{inv} et τ_h pour les séismes artificiels.	65
Tableau 3.2	Indices de décorrélation τ_{inv} et τ_h pour les séismes artificiels (suite).	66
Tableau 5.1	Distance Λ entre les graphiques $R-\mu-T$ brut et décorrélé historiques.	131
Tableau 5.2	Distance Λ entre les graphiques $R-\mu-T$ brut et décorrélé synthétiques.	138
Tableau 5.3	Coefficients \mathbf{p}_{ij} de la formule empirique 2009.	158
Tableau 5.4	Coefficients \mathbf{q}_{ij} de la formule empirique 2009.	159
Tableau 5.5	Coefficients \mathbf{a}'_{ij} de la formule empirique 2009.	161
Tableau 5.6	Coefficients \mathbf{b}'_{ij} de la formule empirique 2009.	164
Tableau 6.1	Résumé des valeurs de \tilde{C}_y pour le dimensionnement.	188
Tableau 6.2	Valeurs de la force équivalente F_e pour le dimensionnement (kN).	189
Tableau 6.3	Pourcentage d'acier ρ_t calculé d'après le dimensionnement YPS.	191
Tableau 6.4	Procédure itérative pour la méthode de dimensionnement utilisant les YPS.	193
Tableau 6.5	Valeurs de dimensionnement en fonction de la formule $R-\mu-T$ choisie.	196
Tableau 6.6	Tableau récapitulatif des valeurs de S_f et R_f	201
Tableau 6.7	Facteur de corrélation moyens obtenus par Christopoulos.	203
Tableau I.1	Séismes historiques du Nord-est américain (ENA) traités	222
Tableau I.1	Séismes historiques du Nord-est américain (ENA) traités (Suite).	223

Tableau I.2	Séismes historiques du Nord-ouest américain (WNA) traités.	224
Tableau I.3	Séismes artificiels du Nord-est américain (ENA) traités.	225
Tableau I.3	Séismes artificiels du Nord-est américain (ENA) traités (Suite). . .	226
Tableau I.3	Séismes artificiels du Nord-est américain (ENA) traités (Suite2). . .	227
Tableau I.4	Séismes artificiels du Nord-ouest américain (WNA) traités.	228
Tableau I.4	Séismes artificiels du Nord-ouest américain (WNA) traités (Suite). .	229
Tableau III.1	Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Est.	243
Tableau III.1	Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).	244
Tableau III.1	Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).	245
Tableau III.1	Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).	246
Tableau III.2	Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Ouest.	247
Tableau III.2	Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Ouest (suite).	248
Tableau III.3	Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes synthétiques de l'Est.	249
Tableau III.4	Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes synthétiques de l'Ouest.	250
Tableau IV.1	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est.	252
Tableau IV.1	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).	253
Tableau IV.1	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).	254
Tableau IV.1	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).	255

Tableau IV.1	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).	256
Tableau IV.1	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).	257
Tableau IV.1	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).	258
Tableau IV.2	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Ouest.	259
Tableau IV.2	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Ouest (suite).	260
Tableau IV.2	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Ouest (suite).	261
Tableau IV.3	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes synthé- tiques de l'Est.	262
Tableau IV.3	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes synthé- tiques de l'Est (suite).	263
Tableau IV.4	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes synthé- tiques de l'Ouest.	264
Tableau IV.4	RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes synthé- tiques de l'Ouest (suite).	265

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I	TABLEAUX DES SÉISMES TRAITÉS	221
ANNEXE II	SPECTRES ÉLASTIQUES CLASSÉ PAR (M, R)	230
ANNEXE III	RAPPORTS D'AMPLITUDE ÉLASTIQUES (RASE)	234
ANNEXE IV	RAPPORTS D'AMPLITUDE INÉLASTIQUES (RASI)	251

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

- :	Sans objet ; dans un tableau, signifie qu'une donnée n'a pas de raison d'être calculée.
$\dot{\square}$:	Dérivée par rapport au temps de la variable \square .
$\ddot{\square}$:	Dérivée seconde par rapport au temps de la variable \square .
a :	Paramètre de régression pour les relations R - μ - T de Nassar et Krawinkler.
A :	Spectre ou Pseudo-spectre élastique d'accélération absolue.
\overline{A} :	Spectre ou Pseudo-spectre élastique d'accélération absolue normalisé.
$A^{(\mu)}$:	Pseudo-spectre d'accélération non-linéaire pour la ductilité μ .
$\overline{A}^{(\mu)}$:	Pseudo-spectre d'accélération non-linéaire normalisé pour la ductilité μ .
$a_i(t)$:	Accélération sismique du sol dans la direction $i = x, y, z$ à un instant t .
$a_j(t)$:	Accélération sismique principale du sol dans la direction $j = 1, 2, 3$ à un instant t .
$a_{\text{RMS}}(t)$:	"Root Mean Square", Moyenne quadratique de l'accélérogramme.
b :	Paramètre de régression pour les relations R - μ - T de Nassar et Krawinkler.
B :	Amplitude maximale en mm lue sur le sismomètre Wood-Anderson (définition de l'échelle de Richter).
B_0 :	Amplitude maximale en mm lue sur le sismomètre Wood-Anderson pour le séisme de référence.
C :	Matrice d'amortissement.
$C_y^{(\mu)}$:	Coefficient de force plastique pour une ductilité donnée.
$\tilde{C}_y^{(\mu)}$:	Coefficient de force plastique approximé pour une ductilité donnée.
d :	Distance à l'hypocentre.
D :	Spectre ou Pseudo-spectre de déplacement relatif.
D :	Diamètre d'une pile de pont circulaire.
d_e :	Profondeur effective d'une section.

DDL :	"Degré De Liberté".
dt :	Pas d'intégration de la méthode de Newmark ; variable d'intégration muette.
E_c :	Module d'Young du béton.
E_s :	Module d'Young de l'acier.
f'_c :	Résistance en compression du béton.
$f(\mu, T)$:	Fonction d'évaluation de la formule empirique $R-\mu-T$ développée dans ce mémoire.
$ F(\omega) $:	Amplitude fréquentielle de Fourier.
f_0 :	Force maximum au sein du système linéaire équivalent.
f_{us} :	Force limite d'écoulement de l'acier.
f_y :	Force de plastification.
\bar{f}_y :	Force de plastification relative.
g :	Accélération de la pesanteur.
G :	Paramètre de géographie de la formule empirique $R-\mu-T$ (Est ou Ouest).
\vec{H} :	Accélérogramme horizontal vu comme un vecteur colonne.
H :	Hauteur d'un modèle à un DDL d'une pile de pont.
H_b :	Hauteur de la partie rigide d'un modèle d'une pile de pont.
H_c :	Hauteur de la partie flexible d'un modèle d'une pile de pont.
H_p :	Hauteur de la rotule plastique.
H_i :	Composantes horizontales du repère \mathcal{R}' avec $i = 1, 2$.
h_n :	Hauteur d'un bâtiment utilisée dans la méthode simplifiée d'analyse sismique.
I_A :	Intensité d'Arias.
I_{MM} :	Intensité de Mercalli modifiée.
I_g :	Inertie générale d'une section de béton.
I_{st} :	Inertie des armatures longitudinales.
K :	Matrice de rigidité.

k :	coefficient de rigidité.
k' :	coefficient de rigidité post-plastification.
L :	Distance entre les axes de deux colonnes consécutives.
ℓ :	Variable muette.
M :	Matrice de masse.
m :	Masse.
M_c :	Moment de dimensionnement au sommet d'une colonne.
M_b :	Magnitude des ondes de volumes.
M_L :	Magnitude de Richter.
M_N :	Magnitude de Nuttli.
M_s :	Magnitude de surface.
M_w :	Magnitude du moment sismique.
P_c :	Charge longitudinale de dimensionnement d'une colonne.
P_i :	Charge longitudinale supplémentaire au sein d'une colonne extérieure.
PGA :	"Peak Ground Acceleration", accélération maximum au sol lors d'un séisme.
PGD :	"Peak Ground Velocity", vitesse maximum au sol lors d'un séisme.
PGV :	"Peak Ground Displacement", déplacement maximum au sol lors d'un séisme.
RASEH :	Rapport d'Amplitude de Spectres Élastiques Horizontaux
RASEV :	Rapport d'Amplitude de Spectres Élastiques Verticaux
RASIH :	Rapport d'Amplitude de Spectres Inélastiques Horizontaux
RASIV :	Rapport d'Amplitude de Spectres Inélastiques Verticaux
\Re :	Repère de l'enregistrement sismique original.
\Re' :	Repère pseudo-principal de l'accélération sismique.
\Re_p :	Repère principal de l'accélération sismique.
R_e :	Distance à l'épicentre.

R_f :	Facteur de réduction d'amplitude pour la méthode de génération de spectres verticaux.
R_y ou R :	Facteur de réduction de force.
$R\text{-}\mu\text{-}T$:	Graphique représentant le facteur de réduction de force R_y en fonction de la période T pour une ductilité μ .
$\bar{R}\text{-}\mu\text{-}T$:	Graphique $R\text{-}\mu\text{-}T$ pour des données décorrélées.
r :	Réponse maximale globale.
r_ℓ :	Réponse maximale dans la direction ℓ .
S :	Paramètre du sol de la formule empirique $R\text{-}\mu\text{-}T$ (type A, C, D ou E).
S_f :	Facteur de modification de périodes pour la méthode de génération de spectres verticaux.
t :	Temps.
T :	Période naturelle de vibration.
t_0 :	Durée totale du tremblement de terre.
T_a :	Période naturelle de vibration empirique pour la méthode simplifiée d'analyse sismique.
U :	Vecteur déplacement relatif à un instant t .
u :	Déplacement relatif.
u_0 :	Déplacement maximum au sein du système linéaire équivalent.
U_g :	Vecteur déplacement du sol à un instant t .
u_g :	Déplacement du sol.
u_m :	Déplacement maximum absolu au sein du système non-linéaire.
U_t :	Vecteur déplacement total à un instant t .
u_t :	Déplacement total.
u_y :	Déplacement maximum pour lequel le système reste linéaire.
\vec{V} :	Accélérogramme vertical simulé vu comme un vecteur colonne.
V :	Composante verticale du repère \mathcal{R}' .
V :	Spectre ou Pseudo-spectre de vitesse relative.

W :	Poids sismique.
W_p :	Poids sismique supporté par la pile.
α :	Rapport de la rigidité post-plastification et de la rigidité en régime élastique (en %).
α_0 :	Coefficient moyen de Fourier.
α_n :	Coefficient de Fourier associé au cosinus.
β :	Angle sur un graphique YPS afin de retrouver la période de vibration.
β_d :	Ratio entre la charge permanente maximale et la charge maximale totale.
β_n :	Coefficient de Fourier associé au sinus.
γ :	Rapport entre les diamètres total et entre armatures longitudinales d'une section circulaire.
γ_{ij} :	Coefficient de corrélation entre les composantes i et j .
γ_ℓ :	Rapport d'élanement du système oscillant.
$\Delta \bar{f}_y$:	Pas de calcul pour la force de plastification relative.
ΔT :	Pas de calcul pour la période.
θ :	Angle entre x et la direction principale H_1 .
$\theta_{\vec{H}, \vec{V}}$:	Coefficient de corrélation entre les accélérogrammes \vec{H} et \vec{V} .
Λ :	Critère d'influence de la décorrélation sur les graphiques R - μ - T .
μ :	Ductilité ; Ductilité fixée.
$\tilde{\mu}$:	Ductilité calculée.
ν_H :	Rapport des composantes R - μ - T horizontales pour un séisme décorrélé.
ν_V :	Rapport des composantes R - μ - T verticale et majeure pour un séisme décorrélé.
ν_{xy} :	Rapport des composantes R - μ - T horizontales pour un séisme brut.
ν_z :	Rapport des composantes R - μ - T verticale et horizontale pour un séisme brut.
ξ :	Amortissement critique.
$\bar{\rho}_i$:	Rapport moyen d'amplitude spectral basic ($i = H, V, xy$ ou z).

$\tilde{\rho}_i$:	Rapport moyen d'amplitude spectral modifié ($i = H, V, xy$ ou z).
ρ_H :	Rapport d'amplitude spectral horizontal pour un séisme décorrélé.
ρ_V :	Rapport d'amplitude spectral vertical pour un séisme décorrélé.
ρ_{xy} :	Rapport d'amplitude spectral horizontal pour un séisme brut.
ρ_z :	Rapport d'amplitude spectral vertical pour un séisme brut.
ρ_t :	Pourcentage d'armature d'une section.
σ :	Matrice d'intensité quadratique d'un séisme.
σ_p :	Matrice d'intensité quadratique diagonale dans le repère principal.
τ_{inv} :	Critère d'inversion de la décorrélation sur les spectres horizontaux.
τ_h :	Critère d'influence de la décorrélation sur les spectres horizontaux.
τ_v :	Critère d'influence de la décorrélation sur les spectres verticaux.
ϕ :	Matrice de passage du repère sismique original au repère principal.
Φ :	Coefficient de régression pour les relations R - μ - T de Miranda.
φ_y :	Courbure d'une section à la plastification.
φ_u :	Courbure ultime d'une section.
ψ :	Angle entre la direction principale la plus verticale et l'axe z .
ω :	Pulsation propre, ou fréquence circulaire naturelle.
ω_d :	Pulsation de la réponse dynamique.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte

Parmi les menaces naturelles, les séismes sont certainement les plus meurtrières. En 2008-2009, les secousses sismiques ont provoqué la mort de plus de 80 000 personnes. Les deux secousses du Sichuan les 12 et 25 Mai 2008 : environ 69 181 morts, 18 498 disparus et 374 171 blessés [Xinhuanet 2008] et la catastrophe des Abruzzes en Italie le 6 Avril 2009 : 308 morts, 1179 blessés et 11 disparus [Wikipedia 2009] nous rappellent tristement les désastres que peuvent provoquer ces brusques mouvements de sols. Ce sont principalement la destruction ou l'effondrement des structures qui rendent ces phénomènes sismo-tectoniques si meurtriers. En effet, les drames humains les plus lourds ont lieu dans des zones en voie de développement où les constructions n'ont pas pu résister à de telles sollicitations.

C'est en ce sens que les chercheurs en génie parasismique tentent de développer des codes de construction permettant à la fois d'optimiser le coût et la résistance aux sollicitations dynamiques. Il est évident qu'une région stable tectoniquement ne doit pas avoir les mêmes exigences de construction qu'une région fortement exposée aux risques sismiques. Ainsi, il est de la responsabilité des autorités locales de délimiter des zones à risques. Au Canada plus particulièrement, on distingue 4 zones sismiques : l'Ouest très actif, le Centre stable, le Nord actif peu peuplé et l'Est actif fortement peuplé [Ressources Naturelles Canada 2008]. Les règles de construction dans chacune de ces régions sont adaptées aux risques sismiques mais proviennent principalement d'études menées sur des secousses historiques de l'Ouest du pays. Il est donc pertinent de caractériser la différence entre séismes de l'Est et de l'Ouest pour mieux adapter les normes de conception dans l'Est canadien.

1.2 Problématique

Ce présent mémoire tente de qualifier et quantifier les différences entre les secousses sismiques de l'Est et de l'Ouest du continent Nord-Américain. En se basant sur les enregistrements sismiques historiques et les simulations synthétiques de sismologues, ce travail propose de caractériser les spectres de réponse linéaires et non-linéaires. Il s'intéresse à l'effet de la décorrélation sur les spectres et aux rapports d'amplitude spectrale entre les directions spatiales. On porte une attention particulière sur le rapport d'amplitude vertical qui peut servir à générer des signaux synthétiques verticaux connaissant simplement les signaux horizontaux. De plus, cette maîtrise propose d'adapter les méthodes de construction actuelles au contexte du Québec ou, plus largement, au contexte du Nord-Est Américain. Elle s'attarde plus précisément aux techniques de dimensionnement basées sur le déplacement à la plastification ("displacement based design" en anglais).

1.3 Objectifs

Les objectifs de cette maîtrise sont :

1. Développer des outils de calcul de spectre élastique et inélastique efficaces et modulables. Ces outils devraient pouvoir utiliser n'importe quel logiciel de structure et ses particularités (hysteresis, lois de comportement, algorithmes de calcul, etc.).
2. Construire une large base de données de spectre de réponse pour des secousses historiques et synthétiques du continent Nord Américain. On ordonnera cette base de données en fonction de la situation géographique (Est et Ouest), du couple (Magnitude, Distance épacentrale) et/ou du type de sol.
3. Caractériser les différences entre les spectres linéaires et non-linéaires des séismes bruts et décorrélés, typiques de l'Est et de l'Ouest du continent Nord-Américain.
4. Développer une formule empirique pour le facteur de réduction de force prenant en compte l'effet du sol, la rigidité post-plastification, la situation géographique et la magnitude.
5. Appliquer les résultats de ces études théoriques à des exemples pratiques d'ingénie-

rie.

1.4 Méthodologie

Afin de réaliser ces objectifs, il faudra dans un premier temps s'approprier le sujet en réalisant une revue de littérature. Une recherche préliminaire sur l'activité sismique du continent américain sera réalisée et conduira au fur et à mesure à la précision du sujet. Il faudra ensuite récupérer des signaux sismiques historiques et artificiels¹ de la zone d'étude en consultant des bases de données. Une vérification préalable des données permettra de supprimer quelques enregistrements non conventionnels (défaillance du sismographe, sismographe attaché à une structure ou maximum d'accélération trop faible). On procédera ensuite à la décorrélation de tous les signaux pour obtenir les accélérations selon les directions principales.

Pour analyser toute une base de données, il sera nécessaire de développer un programme automatique permettant de calculer des spectres pour un grand nombre de signaux. Afin de ne pas reprogrammer un logiciel de structure au complet, l'idée est de créer un outil de calcul modulable utilisant un logiciel de structure du marché. Cette méthode de calcul de spectre sera validée grâce à des programmes reconnus comme BISPEC ® ou SEISMOSIGNAL ®. On tentera d'améliorer ensuite le temps de calcul en modifiant les paramètres de convergence de notre algorithme et en optant pour le langage le plus rapide. Les meilleures performances sont réalisées par le logiciel de structure "open source" OPENSEES ® et le langage TCL&TK ®. La présente étude utilisera donc cet outil de calcul pour constituer les spectres de la base de données brutes et décorrélées.

Les analyses statistiques comparatives de la base de données seront traitées à la fois par EXCEL ® et par MATLAB ®. On créera des paramètres permettant de quantifier l'effet de la décorrélation sur les spectres. On cherchera à regrouper les séismes par géographie et couple (Magnitude, Distance épacentrale) afin de caractériser les spectres de réponses et les rapports d'amplitude spectrale. On calculera les graphiques $R-\mu-T$ de la présente base

¹Les données de l'Est sont insuffisantes pour se contenter des signaux historiques

de données puis on les comparera aux formules empiriques de la littérature. On calibrera ensuite une nouvelle formule empirique sur les données calculées plus tôt, en fonction de nombreux paramètres (géographie, sol, rigidité post-plastification, magnitude).

Utilisant la nouvelle relation $R-\mu-T$, on tachera d'appliquer une méthode de dimensionnement basée sur le déplacement pour une pile de pont. On comparera les résultats avec les autres formules empiriques, pour différents sols et sites géographiques afin d'illustrer l'influence de ces facteurs. On exposera enfin d'autres applications possibles de cette étude dans le domaine de la recherche.

1.5 Plan du mémoire

Ce rapport s'articule en cinq parties consistant en une revue de littérature, une étude sur les spectres linéaires de réponse sismique, une étude sur les spectres inélastiques et la demande en ductilité, un développement sur le facteur de réduction de charge et les relations $R-\mu-T$ et une dernière partie présentant des applications possibles aux structures des présentes études théoriques.

La revue de littérature présente la problématique générale liée aux tremblements de terre et à leurs effets sur les constructions de génie civil. Elle détaille les notions de décorrélation stochastique, d'axe principal et de repère principal pour un enregistrement sismique 3D, introduit la définition de spectre de réponse linéaire et non-linéaire, présente la méthode simplifiée de dimensionnement parasismique du CNB 2005 et expose la définition du facteur de réduction de force et les relations empiriques $R-\mu-T$ de la littérature.

Le deuxième chapitre s'attarde sur la création de l'outil de calcul modulable de spectres linéaires et étudie les spectres de réponse linéaires, leurs rapports d'amplitudes en fonction de leur géographie (Est ou Ouest) et l'effet de la décorrélation.

Le troisième chapitre détaille le module de calcul non-linéaire ainsi que l'algorithme de convergence pour une ductilité constante et étudie les spectres de réponses inélastiques, leurs rapports d'amplitude et leur demande en ductilité en fonction de leur géographie.

Le quatrième chapitre étudie les variations du facteur de réduction de charge en fonction de la géographie et calcule les graphiques R - μ - T de la base de données. Elle développe ensuite une relation R - μ - T empirique prenant en compte les paramètres de sols, de géographie, de magnitude et de rigidité post-plastification et la compare aux relations empiriques de la littérature.

Le dernier chapitre expose des applications pratiques de ces travaux théoriques. Elle présente une méthode de dimensionnement basée sur les déplacements pour une pile de pont, discute d'une technique de génération de signaux synthétiques verticaux et débat sur les méthodes d'évaluation de l'effet bidirectionnel des secousses sismiques.

Pour finir, une conclusion résume les principaux résultats obtenus et dégage des pistes de recherche qui permettraient d'affiner ou d'étoffer ce sujet de recherche.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Ce mémoire débute par une revue de littérature afin de présenter le contexte sismique de l'Amérique du Nord et d'introduire les notions physiques et mathématiques nécessaires à la bonne compréhension de ce travail.

Le dimensionnement parasismique d'un ouvrage de génie civil dépend avant tout du degré d'activité sismique de la région considérée. C'est pour cela que cette partie consacre quelques chapitres aux notions fondamentales de sismologie et au contexte sismique du Canada et plus particulièrement du Nord-est Américain. On se demandera alors où se situent les risques sismiques les plus élevés en Amérique du Nord et comment les quantifier.

Ce chapitre énonce par la suite le principe de décorrélation stochastique d'enregistrements sismiques et l'applique à un exemple. On utilisera cette méthode pour caractériser les secousses sismiques dans la suite de ce mémoire. On se demandera si cette méthode permet de déterminer la direction critique d'un séisme, et si elle a un effet sur le dimensionnement des structures.

Ensuite, cette partie présente la notion de spectre de réponse linéaire et non-linéaire, utilisée pour les analyses dynamiques modales des structures. On montrera comment calculer un spectre linéaire et non-linéaire, et l'on expliquera à quoi servent ces données en génie parasismique.

Enfin, on énonce succinctement la méthode simplifiée d'analyse sismique d'un bâtiment du CNB 2005 et l'on présente la notion de facteur de réduction de charge. On illustrera comment le code actuel permet de réduire les efforts sismiques en tenant compte de la surcapacité des matériaux et de la non-linéarité des structures.

2.2 Origine et nature des mouvements sismotectoniques

2.2.1 Origine des séismes

On distingue deux origines de séismes : les séismes naturels et les séismes induits. Dans ce rapport, nous nous intéresserons peu aux séismes induits, ceux causés par l'activité humaine (mise en eau de réservoirs artificiels, exploitation de mines ou de carrières, production pétrolière ou essais nucléaires) mais l'article de H.K Gupta (1997) et la thèse de J.R Grasso (1993) constituent d'excellentes références sur le sujet. Nous nous concentrons ici sur les séismes naturels, plus fréquents et plus destructeurs, dus aux mouvements relatifs de la croûte terrestre.

Les mouvements des plaques tectoniques peuvent, par endroit, induire de grandes déformations et donc de fortes contraintes. Cette énergie élastique emmagasinée lors de la déformation peut soudainement se dissiper lors d'une rupture ou d'un glissement sous forme d'ondes sismiques. Ces phénomènes de rupture se produisent en général dans la croûte terrestre au niveau des connexions de plaques tectoniques (zones de subduction, de divergence ou de mouvement latéral). Cela dit, on recense aussi quelques secousses à l'intérieur même des plaques (figure 2.1). Ce sont ces séismes là que l'on retrouve dans l'Est canadien et leur mécanisme reste, de nos jours, méconnu.

C'est la théorie élastique de Reid (figure 2.2 (a)) qui, pour la première fois, a donné une explication physique aux phénomènes sismiques. Elle pose comme principe qu'une faille ne peut bouger tant que des contraintes substantielles ne s'accumulent pas de chaque côté. Ces contraintes s'accumulent jusqu'à atteindre la limite du roc qui, brutalement, va reprendre une position d'équilibre sans contraintes. Ce choc s'accompagne d'une propagation d'ondes sismiques.

Le mécanisme de rupture peut conduire à trois types de failles :

- La faille de glissement latéral
- La faille normale où le bloc du dessus plonge vers le centre de la terre suite à un

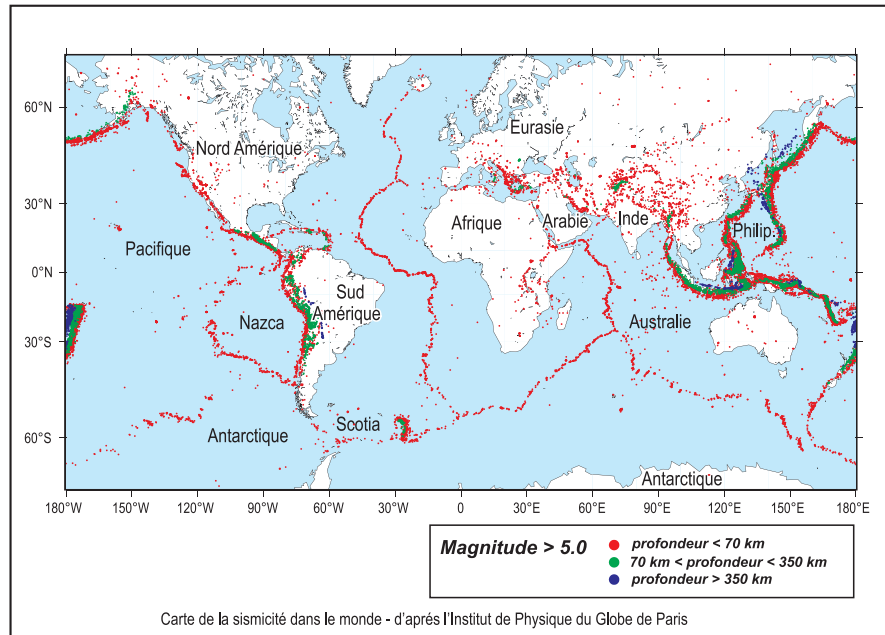


FIG. 2.1 : Sismicité du globe, magnitude > 5 [Institut de Physique du Globe de Paris].

écartement de la faille

- La faille inverse où le bloc du dessus s'élève suite à un resserrement de la faille

2.2.2 Nature du phénomène

Après le choc de rupture situé à l'*hypocentre*, le séisme à proprement parlé, se propage. Il est constitué de quatre types d'ondes sismiques : deux ondes de volume (les ondes P et les ondes S) et deux ondes de surface (les ondes de Love et les ondes de Rayleigh).

1. Les ondes de volume : Elles se propagent à travers la croûte terrestre et sont très rapides. Elles se dissipent en fonction de l'inverse de la distance à hypocentre ($\equiv \frac{1}{d}$).
 - Les ondes P (ondes primaires) : Ce sont des ondes de tension compression voyageant dans la direction du front d'ondes. On les nomme ondes primaires car ce sont les premières ondes enregistrées par le sismographe. Elles présentent des fréquences de vibration importantes et sont peu nocives pour les structures de génie civil.

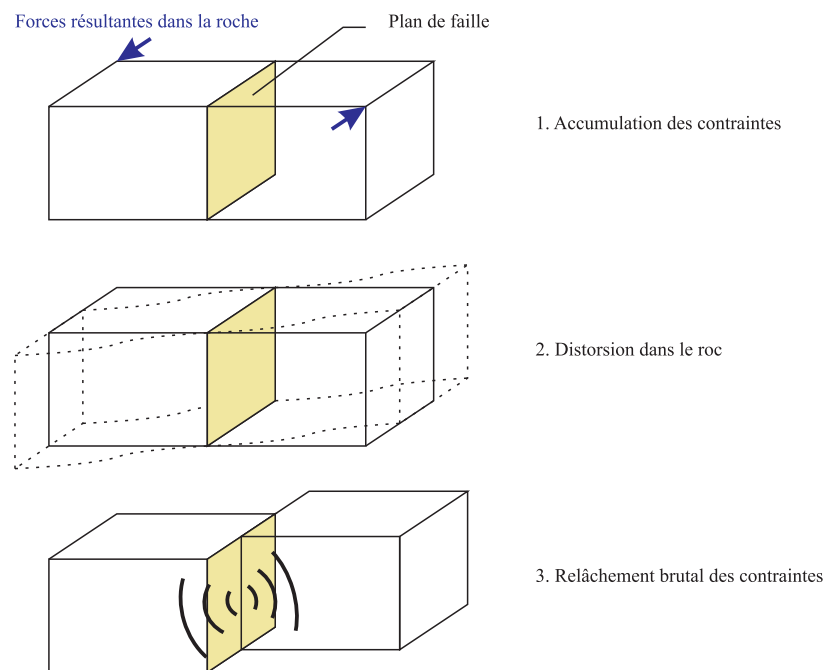


Figure (a)

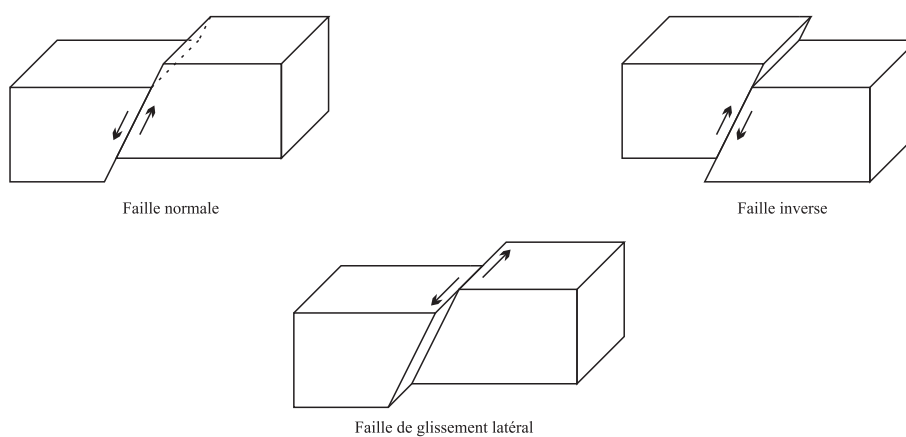


Figure (b)

FIG. 2.2 : (a) Théorie élastique de Reid, (b) Mécanisme de rupture des failles terrestres [adapté de Filiatrault 1996].

- Les ondes S (ondes secondaires) : Ce sont des ondes de cisaillement se propageant dans la direction perpendiculaire au front d'ondes. On les enregistre plus ou moins rapidement après les ondes P dépendant de la distance à l'hypocentre et des propriétés des sols traversés. Leur fréquence de vibration est relativement basse mais leur amplitude peut être importante. Ce sont les ondes responsables de la majorité des dommages de bâtiments ou autres structures.
2. Les ondes de surface : Elles prennent naissance à la surface de la terre, exactement à l'*épicentre* : point de la surface terrestre à la verticale de l'hypocentre. Ces ondes se propagent uniquement à la surface et sont assez lentes. Elles ont une période de vibration généralement grande qui ne cause pas de dangers pour les structures. Leur amplitude se dissipe proportionnellement à l'inverse de la racine de la distance à l'hypocentre ($\equiv \frac{1}{\sqrt{d}}$). Les ondes de surface se propagent donc sur une plus grande distance que les ondes de volume.
- Les ondes de Rayleigh : Ce sont des ondes verticales créant un mouvement elliptique à la surface du sol semblable à la houle.
 - Les ondes de Love : Ce sont des ondes horizontales de cisaillement se propageant à la surface du sol.

L'ensemble de ces ondes crée des mouvements et des accélérations de sol responsables de dégâts matériels et humains (figure 2.4). L'équation du mouvement d'une telle situation pour une structure peut s'écrire comme suit :

$$\mathbf{M}\ddot{U}_t(t) + \mathbf{C}\dot{U}(t) + \mathbf{K}U(t) = 0 \quad (2.1)$$

Avec \mathbf{M} , la matrice de masse, \mathbf{C} la matrice d'amortissement, \mathbf{K} la matrice de rigidité, $U_t(t)$ le vecteur déplacement total du système et $U(t)$ le vecteur déplacement relatif. Le déplacement du sol $U_g(t)$ est relié à ces deux déplacements par la relation :

$$U_t(t) = U_g(t) + U(t) \quad (2.2)$$

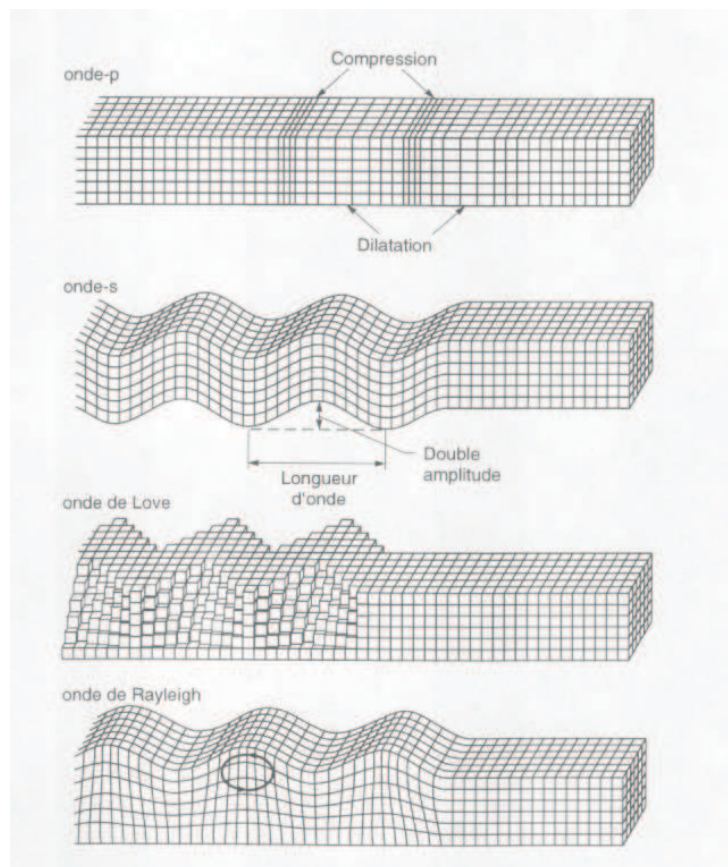


FIG. 2.3 : Représentation de ondes sismiques [Filiatrault 1996].

On peut donc transformer l'équation (2.1) en ne mettant en jeu que les déplacements relatifs de la structure et l'accélération du sol.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U}(t) = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}_g(t) \quad (2.3)$$

On remarque qu'une structure soumise à un vecteur accélération à sa base a le même comportement qu'une structure à base fixe soumise à un vecteur force d'intensité égale au produit de sa matrice de masse par ce vecteur accélération et appliqué dans la direction opposée. Grâce à cette nouvelle équation et aux données fournies par un sismographe, soit $\ddot{\mathbf{U}}_g(t)$, on peut directement calculer les déplacements et déformations au sein de la structure et en déduire les contraintes dans les matériaux. L'état des contraintes à un instant t dépend de l'historique de l'accélérogramme. Il est donc important de prévoir quel type de séisme la région risque de subir afin de bien dimensionner les structures.

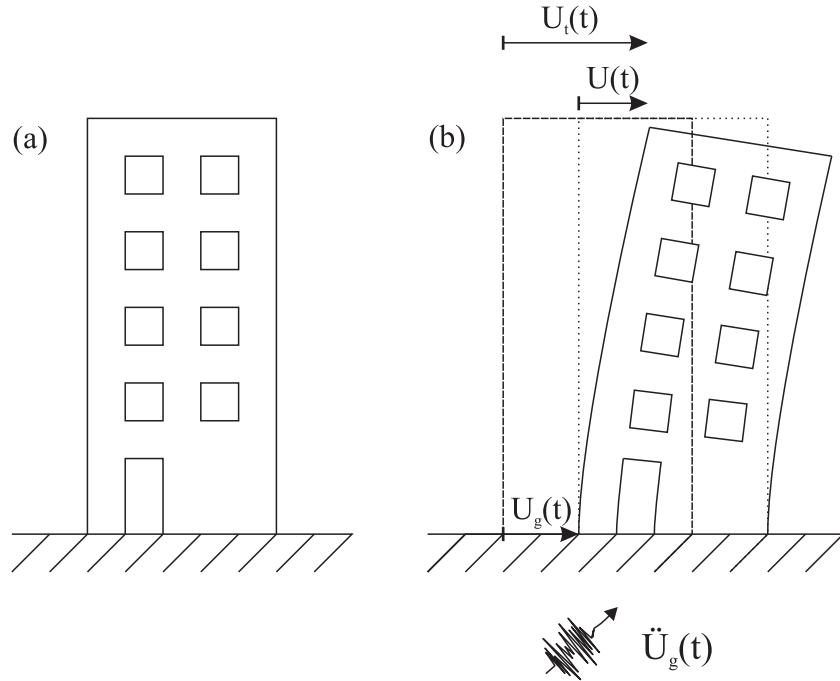


FIG. 2.4 : (a) Bâtiment à l'équilibre. (b) Bâtiment déformé lors d'un séisme.

À ce sujet, on définit les notions stochastiques d'*aléa* et de *risque* sismique d'une région. L'aléa est la probabilité d'apparition d'un séisme causant un certain niveau de vibration du sol donnée. Le risque sismique, quant à lui, résulte du produit de l'aléa sismique et de la vulnérabilité géographique. Cette dernière est liée à l'état des bâtiments et des ouvrages d'art, et à la densité de population d'une région. Ainsi, pour obtenir le plus grand bénéfice pour la société, les normes parasismiques d'un territoire sont calibrées sur le risque sismique de la région et non sur l'aléa.

2.3 Caractérisation des secousses

2.3.1 Caractéristiques du signal

Afin d'étudier les séismes, les centres de surveillance géotechnique enregistrent en permanence les vibrations du sol. Pendant un tremblement de terre à proximité d'une station, un sismographe mesure l'accélération, la vitesse et le déplacement instantané du sol. Les échantillons réalisés ont un pas de temps variant de 0.005 à 0.1 seconde. Ces informations constituent le signal sismique. La caractérisation des secousses commence par une analyse des signaux sismiques. Ces grandeurs physiques sont sujettes à l'erreur de mesure et sont généralement corrigées artificiellement. Dans ce travail de recherche, on utilisera des données corrigées mais non filtrées. La correction consiste à retrancher un polynôme au signal afin que la vitesse finale et le déplacement ultime soient nuls. Après quelques études comparatives, on a montré qu'un polynôme de degrés 0 suffisait pour limiter les effets sur les spectres de réponse (voir paragraphe 2.6). Cette correction simple, nommée "base line correction", consiste simplement à retrancher la moyenne au signal brut.

On distingue trois paramètres importants du signal caractérisant les secousses sismiques :

- **La valeur maximale du signal :**

Pour l'accélération, on appelle cette valeur le PGA ("Peak Ground Acceleration"), pour la vitesse le PGV ("Peak Ground Velocity") et pour le déplacement le PGD ("Peak Ground Displacement"). Ces valeurs ne peuvent pas rendre compte des caractéristiques du séisme mais donnent une idée de son intensité. Le PGA est la va-

leur la plus utilisée des trois. Il s'exprime en pourcentage de l'accélération terrestre (% g). Son ordre de grandeur pour un séisme meurtrier est de 0.5 g (Sichuan 2008 PGA = 0.65 g [Zhenming 2008] alors qu'un séisme ressenti avec peu de dégâts aura un PGA de 0.05 g. On utilise parfois une moyenne quadratique noté RMS ("Root Mean Square") pour quantifier aussi l'intensité du signal. Cette dernière grandeur a pour expression : $a_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} a(t)^2 dt}$.

– **Le contenu fréquentiel de l'enregistrement :**

On peut l'évaluer de 3 façons différentes.

◊ Évaluation de la fréquence simple : Il suffit de compter le nombre total de cycles ¹ du signal et de le diviser par la durée totale de l'enregistrement.

◊ Analyse de Fourier : On peut décomposer le signal sismique en série de Fourier pour évaluer la bande de fréquence la plus énergétique. On rappelle que l'accélération $a(t)$ a la décomposition suivante en série de Fourier :

$$a(t) = \alpha_0 + \sum_{n \in \mathbb{N}^*} \alpha_n \cos(\omega_n t) + \beta_n \sin(\omega_n t) \quad (2.4)$$

$$\text{avec : } \omega_n = \frac{2n\pi}{T} \quad (2.5)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} a(t) dt \quad (2.6)$$

$$\alpha_n = \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} a(t) \cos(\omega_n t) dt \quad (2.7)$$

$$\beta_n = \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} a(t) \sin(\omega_n t) dt \quad (2.8)$$

Pour une pulsation ω_n donnée, "l'énergie" du signal (ou amplitude fréquentielle) vaut alors :

$$|F(\omega)| = \frac{1}{t_0} \sqrt{\alpha_\omega^2 + \beta_\omega^2} = \sqrt{\left(\int_0^{t_0} a(t) \cos(\omega t) dt \right)^2 + \left(\int_0^{t_0} a(t) \sin(\omega t) dt \right)^2} \quad (2.9)$$

◊ Spectre de réponse : On peut également analyser le contenu fréquentiel en se ser-

¹Un cycle est l'alternance de grandeurs positives puis de grandeurs négatives

vant du spectre de réponse de l'accélérogramme représentant les réponses maxima d'un ensemble d'oscillateurs simples, avec différentes périodes de vibration (T) et fractions d'amortissement critique (ξ). (voir paragraphe 2.6)

– **La durée du tremblement de terre :**

Dans l'esprit des gens, la durée d'un tremblement de terre est simplement la durée pendant laquelle on ressent des vibrations. En génie parasismique, on donne deux autres définitions scientifiques. La première considère le temps pendant lequel les accélérations sont supérieures à une valeur minimale arbitraire (usuellement 0.05 g). La deuxième, développée par R. Dobry, I. Idriss et E. Ng en 1978 consiste à définir la durée comme le temps nécessaire pour emmagasiner entre 5 et 95 % de l'énergie de l'accélérogramme représenté par la mesure d'intensité, I_A , (Arias 1970).

$$I_A = \frac{\pi}{g} \int_0^{t_0} a(t)^2 dt \quad (2.10)$$

On appelle cette durée la "durée de Trifunac-Brady".

2.3.2 Les échelles de magnitude

Même si les paramètres que nous venons de décrire permettent d'appréhender quelques caractéristiques d'une secousse, ils ne peuvent pas quantifier l'importance de cette dernière. L'idée la plus simple fut de créer une échelle de puissance sismique basée sur les dommages matériels causés. En 1902, Mercalli introduit une échelle subjective décrivant l'ampleur locale des dégâts en fonction de l'éloignement de l'épicentre. Par la suite, des sismologues californiens (H.O. Wood et F. Neumann) ont modifié cette échelle pour mieux l'adapter aux techniques modernes de construction. Elle est connue sous le nom d'*échelle de Mercalli modifiée* (I_{MM}) et sert encore de nos jours dans les régions non instrumentées (tableau 2.1). Cependant, cette classification dépend fortement de l'état des constructions parasismiques et ne constitue pas une réelle mesure scientifique des tremblements de terre.

C'est au début des années 30 que C.F. Richter propose enfin une méthode rationnelle dé-

finissant une norme d'intensité appelée magnitude et notée M_L . La magnitude de Richter est donnée par la relation :

$$M_L = \log B - \log B_0 \quad (2.11)$$

où B représente l'amplitude maximum en mm lue sur le sismomètre Wood-Anderson ² et B_0 l'amplitude maximum en mm du séisme de référence ³ pour la même distance à l'épicentre. L'avantage de cette magnitude, c'est qu'elle ne dépend ni de la distance à l'épicentre, R_e , ni de la qualité des constructions parasismiques. Cette grandeur est bien seulement une caractéristique de l'intensité du tremblement de terre.

Il existe aujourd'hui de nombreuses autres échelles de magnitude. Les quatre plus utilisées sont :

- L'échelle de magnitude de surface (M_s) : Elle est basée sur la mesure de l'amplitude spectrale du sol à 0.05 Hz. Elle sert principalement pour des enregistrements effectués loin de l'épicentre.
- L'échelle de magnitude des ondes de volume (M_b) : Cette échelle se base sur l'amplitude des ondes P, pour une fréquence de 1 Hz. Elle sert pour les séismes dont l'hypocentre est très profond.
- L'échelle de magnitude du moment sismique (M_w) : Cette échelle, plus récente, est le produit du module de cisaillement du roc, de la surface de rupture et de la longueur moyenne de rupture. Cette définition trouve un certain écho dans la communauté scientifique.
- L'échelle de magnitude de Nuttli (M_N) : Elle est basée sur la mesure de l'amplitude des ondes de Rayleigh à 1 Hz. C'est l'échelle de magnitude qu'utilise la Commission Géologique du Canada depuis les années 60.

²Cet instrument possède une période naturelle de 0.8 s, un amortissement critique de 80 % et une amplification statique de 2800

³Richter a choisi un séisme pour lequel $B_0 = 0.001$ mm pour une distance à l'épicentre de $R_e = 100$ km

Tableau 2.1 : Échelle d'intensité de Mercalli modifiée (I_{MM}) adaptée de Wood, Newman et Filiatrault.

Intensité I_{MM}	Description	Accélération maximum du sol (%g)
I & II	Décelée à l'aide d'instruments sensibles. Ressentie par quelque personnes aux étages supérieurs. Objets suspendus peuvent balancer	< 0.003
III	Ressentie à l'intérieur seulement mais pas souvent reconnue. Autos stationnées bougent.	0.003 - 0.007
IV	Ressentie par tout le monde à l'intérieur. Provoque le réveil. Autos stationnées bougent assez fortement.	0.007 - 0.015
V	Ressentie par tout le monde. Porcelaine cassée. Plâtre fissuré.	0.015 - 0.030
VI	La plupart des gens sont effrayés. Plâtre tombe. Cheminées endommagées. Dégâts mineurs.	0.030 - 0.070
VII	Tout le monde fuit les maisons et les bâtiments. Dommages aux structures dépendant de la qualité de construction.	0.070 - 0.150
VIII	Murs de séparation brisés ; statues, murs écroulés. Conducteur d'auto incommodés.	0.150 - 0.300
IX	Bâtiments déplacés de leurs fondations, fissurés, inclinés. Conduites souterraines se brisent.	0.300 - 0.700
X	Glissement de terrain. Rails courbés. Structures en maçonnerie démolies. Terre s'ouvre.	0.700 - 1.50
XI	Ponts démolis. Seules les nouvelles structures ne s'écroulent pas mais sont très endommagées.	1.50 - 3.00
XII	Destruction totale.	3.00 - 7.00

2.4 Contexte sismique au Canada

2.4.1 Les zones sismiques du Canada

On appelle *zone sismique* un secteur géographique où l'on recense une concentration importante d'épicentres historiques [Ressources Naturelles Canada 2008]. Il est alors probable que les séismes d'une même zone sismique aient une cause commune. C'est dans le but de calculer des aléas et des risques sismiques régionaux que le découpage en zones du Canada a commencé. On distingue 4 zones principales (figure 2.5) :

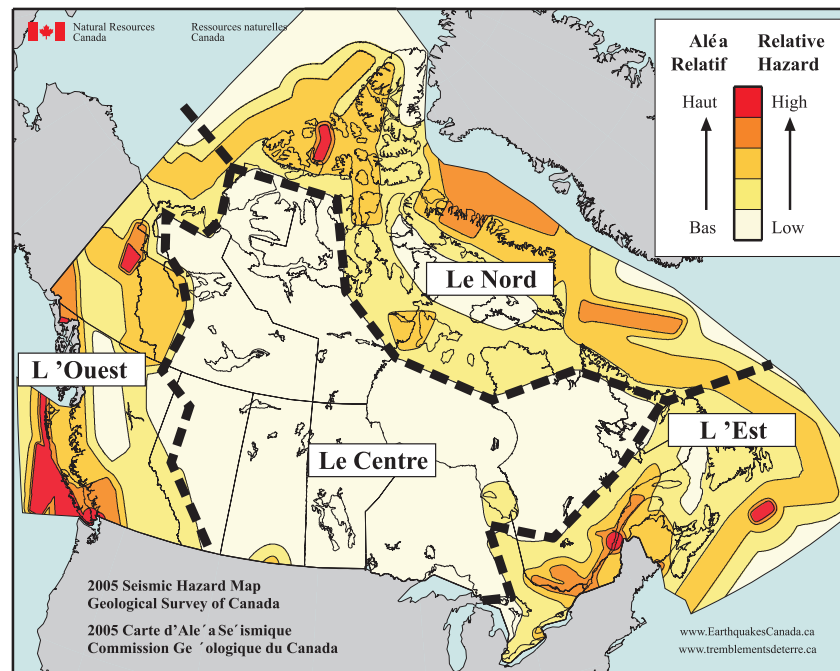


FIG. 2.5 : Zones et Aléa sismique du Canada [adapté de la Commission géologique du Canada 2005].

– L'Ouest Canadien :

Délimitée à l'Est par le début des grandes plaines, cette zone est de loin la plus active du Canada. On localise chaque année plus de 1000 secousses et au cours des 70 dernières années, on a recensé plus de 100 séismes d'une magnitude supérieure ou égale à 5. Cette

activité provient directement des mécanismes tectoniques. On observe des phénomènes de subduction, de collision, de glissement et de divergence mettant en jeu 5 plaques tectoniques : la plaque de Juan de Fuca, la plaque Explorer, la plaque Gorda Sud, la plaque Pacifique et la plaque Nord-Américaine (figure 2.6). Le plus important séisme de l'histoire du Canada ($M_L = 8.1$ sur l'échelle de Richter) s'est produit le 22 août 1949, le long de la faille de la Reine-Charlotte (continûment canadien de la faille de St Andreas). Les sismologues s'attendent à un gigantesque séisme de subduction à l'Ouest de l'île de Vancouver similaire au séisme de $M_L = 9.2$ en Alaska en 1964 ou à celui de $M_L = 9.5$ au Chili en 1960. Cette zone de subduction est appelée zone de subduction de Cascadia. D'autres secteurs de l'Ouest ont une activité sismique significative comme le Sud-ouest du Yukon et la Cordillère septentrionale.

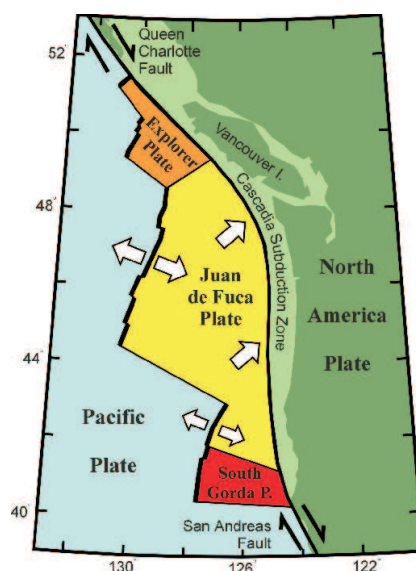


FIG. 2.6 : Contexte tectonique de la côte Pacifique Canadienne [Commission géologique du Canada 2006].

– Le Centre :

La région centrale du Canada, délimitée au nord par le 60° de latitude nord, à l'Ouest par les Rocheuses et à l'Est par l'axe reliant les Grands-Lacs au Labrador ne présente pas ou très peu de risque sismique. Constituée de roches très dures (bouclier canadien), cette région ne ressent que très peu de séismes. L'activité sismique se résume à une

secousse de $M_L = 5.5$ à la frontière entre le Canada et les États-Unis en 1909 et à quelques séismes induits associés à l'extraction minière de potasse en Saskatchewan méridionale.

– **Le Nord :**

Le Grand Nord Canadien présente une activité sismique notable avec, entre autre, les séismes de Nahanni (5 octobre et 23 décembre 1985) de magnitudes $M_L = 6.6$ et $M_L = 6.9$. Cependant on connaît peu l'histoire des tremblements de terre dans ce secteur ; ce n'est que récemment que les sismologues ont été en mesure de déceler et de localiser des séismes de faible magnitude dans cette région.

– **L'Est Canadien :**

L'Est du Canada est situé au milieu de la plaque de l'Amérique du Nord, loin des zones tectoniques actives. Néanmoins, des séismes dévastateurs de forte magnitude s'y produisent. Chaque année, environ 450 secousses sont enregistrées et au cours de 10 ans, 3 séismes en moyenne dépassent la magnitude 5. Les causes de ces secousses sont mal connues. L'activité sismique semble être liée à des champs de contraintes régionaux, étant donné que les séismes se concentrent dans les zones de faiblesse de la croûte terrestre.

2.4.2 La particularité de l'Est Canadien

La région du Québec et ses alentours présente de nombreuses particularités sismiques qui intriguent les géologues et sismologues. On l'a déjà dit, ce territoire pourtant stable tectoniquement ressent fréquemment de fortes secousses. On identifie 3 zones de l'Est présentant des comportements sismiques proches :

- L'Ouest du Québec : La sismicité de la région de la rivière Ottawa semble se distribuer selon deux bandes assez distinctes. La première bande suit la rivière Ottawa de Temiscaming au Nord jusqu'à Cornwall et Montréal au Sud. L'autre bande, présentant plus de séismes de faible intensité s'étend du réservoir Baskatong au Nord jusqu'à Montréal au Sud (figure 2.7). Selon Forsyth, cité par Adams et Basham (1989), on peut associer

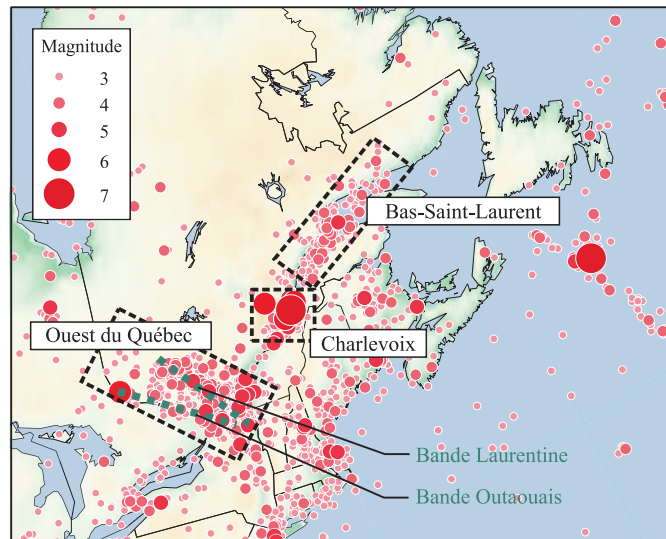


FIG. 2.7 : Zone sismique de l'Est Canadien [adapté de Adams et Basham 1989 et de la Commission géologique du Canada 2007].

la première bande à une zone de failles actives il y a 250 à 500 millions. La seconde bande s'explique moins facilement par la présence d'un point chaud sous l'Amérique du Nord, il y a 120 à 140 millions d'années.

- La région de Charlevoix : C'est la région la plus active historiquement de l'Est du Canada. Il y a eu depuis 1663, 6 séismes de magnitude supérieure ou égale à 6. Le dernier séisme conséquent de ce secteur remonte au 25 novembre 1988. Son épicentre était à proximité de la ville du Saguenay et sa magnitude était de ($M_w = 5.9$). L'activité sismique de cette région fait actuellement débat. Certains pensent qu'un impact météoritique influencerait la sismicité de ce site. D'autres soupçonnent la présence d'un rift aux failles actives le long du fleuve Saint-Laurent suite à l'ouverture de l'Océan Atlantique [Ressources Naturelles Canada 2008]. Aucune de ces nombreuses théories ne fait aujourd'hui l'unanimité.
- La région du Bas-Saint-Laurent : Cette zone commence à 400 km en aval de Québec. Même si aucun séisme majeur n'a été constaté dans cette région, on enregistre régulièrement des secousses de moyenne importance (de $M_L = 3$ à $M_L = 5$). On accorde cette activité sismique à la compression uniforme de l'Est du Canada [Filiatrault 1996].

Au delà des causes géologiques particulières, la sismicité de l'Est Canadien se démarque par ses mécanismes de rupture, sa faible atténuation des ondes sismiques et son haut contenu fréquentiel. Comme on vient de le décrire, les mécanismes de rupture de l'Est sont mal connus et nécessitent par conséquent des hypothèses de comportement alors qu'à l'Ouest on se base sur des observations historiques. Les fortes secousses du Québec sont souvent ressenties et mesurées jusqu'à de très longues distances. Le tremblement du Saguenay (1988) par exemple a été ressenti à Washington D.C. (États-Unis) soit à plus de 1200 km. Les ondes de l'Est sont peu atténuées comparées à celles de l'Ouest. A Vancouver, (Ouest) on ne ressent pas un séisme à plus de 100 km. Enfin, le contenu fréquentiel est très différent à l'Est. On constate une part beaucoup plus importante de l'énergie du séisme en haute fréquence. Par conséquent, ce ne seront pas les mêmes structures qui seront touchées à l'Est et à l'Ouest du Canada.

2.4.3 Séismes historiques du continent Nord Américain à l'étude

L'étude sismologique entreprise dans ce mémoire se consacre à la fois aux données sismiques historiques et artificielles de l'Amérique du Nord. La base de données d'accélérogrammes historiques se limite à 22 enregistrements de l'Est et 5 enregistrements de l'Ouest (figure 2.9). On retrouve à l'Est les séismes d'Etowah (1 site), de Miramichi (5 sites), de Nahanni (5 sites) et de Saguenay (11 sites). À l'Ouest, on utilise les séismes de l'Imperial Valley (1 site), de Loma Prieta (1 site), de Northridge (1 site), de Parkfield (1 site) et de San Fernando (1 site). Chaque site possède 3 composantes (2 horizontales et 1 verticale). Le choix de ces 27 séismes permet de construire un bon échantillon des séismes historiques du Nord-Est Américain et de le comparer aux tendances de l'Ouest. On retrouve les informations sismiques de ces sites aux tableaux I.1 et I.2.

Afin de caractériser les secousses sismiques, on regroupe les tremblements de terre selon leur géographie (Est ou Ouest), leur magnitude du moment sismique (M_w) et leur distance épacentrale (R_e). On parle d'une classification géographique selon le couple (M_w , R_e) ou pour simplifier (M, R). On distingue dans notre cas dix familles de séismes historiques :

1. À l'Est avec $M_w \leq 5.7$ et $R_e \approx 5$ km : On compte tous les séismes de Miramichi et les séismes de Nahanni NAH2 et NAH3 (voir tableau I.1).
2. À l'Est avec $M_w \leq 5.7$ et $R_e \approx 20$ km : On trouve les séismes d'Etowah et de Nahanni NAH5
3. À l'Est avec $M_w > 5.7$ et $R_e \approx 5$ km : Il s'agit du séisme de Nahanni NAH1.
4. À l'Est avec $M_w > 5.7$ et $R_e \approx 20$ km : Il s'agit du séisme de Nahanni NAH4.
5. À l'Est avec $M_w > 5.7$ et $R_e \approx 50$ km : On regroupe les séismes de Saguenay SAG8 et SAG9.
6. À l'Est avec $M_w > 5.7$ et $R_e \approx 90$ km : On retrouve les séismes de Saguenay SAG4, SAG5 et SAG10.
7. À l'Est avec $M_w > 5.7$ et $R_e > 90$ km : On retrouve les séismes de Saguenay SAG1, SAG2, SAG6, SAG7 et SAG11.
8. À l'Ouest avec $M_w \leq 6.8$ et $R_e \approx 10$ km : Il s'agit du séisme de Parkfield (voir tableau I.2).
9. À l'Ouest avec $M_w \leq 6.8$ et $R_e \approx 20$ km : On retrouve les séismes de Northridge et de San Fernando.
10. À l'Ouest avec $M_w > 6.8$ et $R_e \approx 10$ km : On regroupe les séismes de l'Imperial Valley (El Centro) et de Loma Prieta.

Afin d'intégrer les séismes de Miramichi et de Nahanni dans notre classification en fonction de la magnitude du moment sismique (M_w), une conversion d'échelle de magnitude a été faite en utilisant des relations empiriques détaillées dans l'ouvrage de Filiatrault 1996.

Les magnitudes approchées des dits enregistrements sont :

- Pour MIR1, MIR2, MIR3 et MIR5 on a $M_w \approx 4.8$
- Pour MIR4 on a $M_w \approx 3.8$
- Pour NAH1 et NAH4 on a $M_w \approx 6.4$
- Pour NAH2 on a $M_w \approx 5.3$
- Pour NAH3 on a $M_w \approx 4.6$
- Pour NAH5 on a $M_w \approx 5.2$

On remarque que le signal SAG3 présente une anomalie. En effet, l'enregistrement selon la direction y semble bien faible pour être vraisemblable. On suppose que l'accélérogramme s'est cassé dans cette direction lors de l'enregistrement. Par conséquent, on ne considérera pas cette composante du signal dans la suite des analyses.



FIG. 2.8 : Dégâts de quelques séismes historiques. (a) Mairie de Montréal Est (Saguenay) [Ressources Naturelles Canada 2009]. (b) Condo de Los Gatos (Loma Prieta) [Martin and Associates 2009]. (c) Échangeur proche de l'épicentre de Northridge [USGS 2009].

2.4.4 Séismes artificiels du continent Nord Américain à l'étude

Ce mémoire se consacre aussi à l'étude des signaux artificiels Nord-Américains. Il utilise deux séries d'accélérogrammes synthétiques générés par G. Atkinson, l'une datant de 1999 [Atkinson et Beresnev 1998] et l'autre plus récente de 2009 [Atkinson 2009]. La première série sera utilisée dans la majeure partie de ce rapport alors que la série de 2009 sera utilisée uniquement pour le développement d'une formule $R-\mu-T$ intégrant les paramètres de sols (voir paragraphe 5.5.2.2).

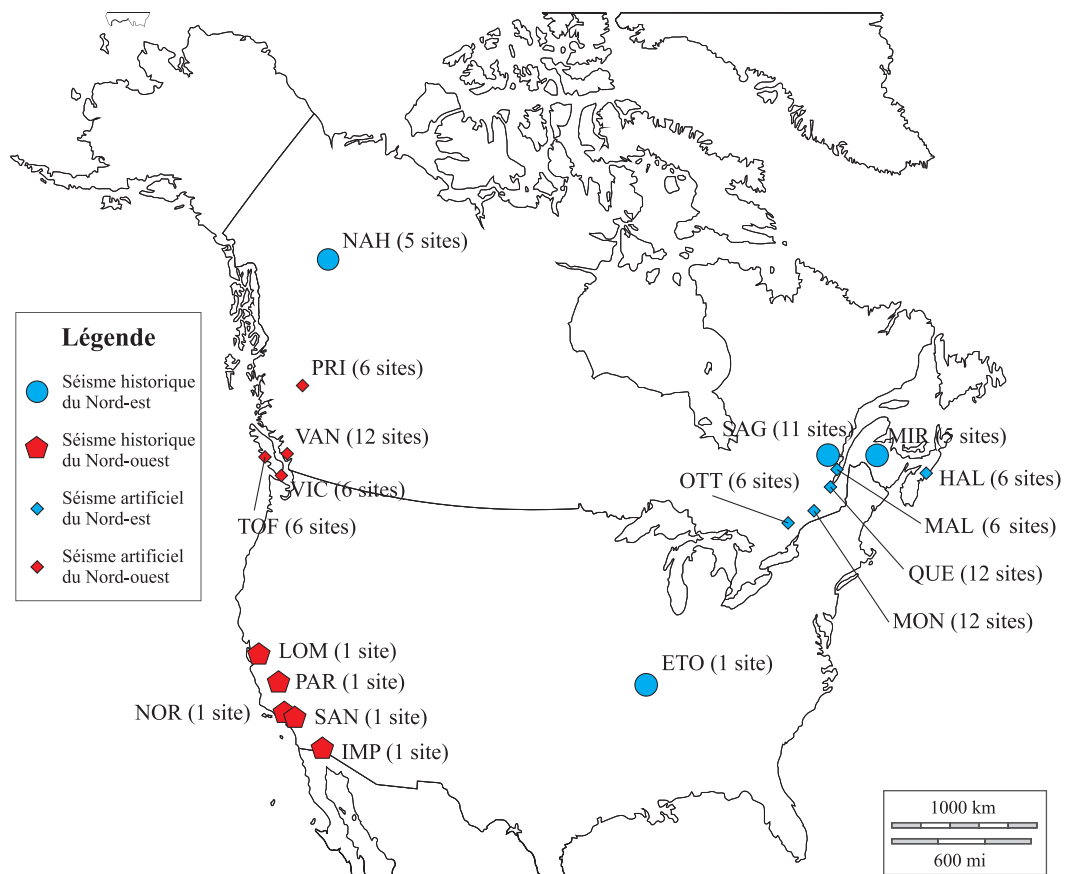


FIG. 2.9 : Localisation des séismes étudiés.

2.4.4.1 Données de 1999

Ces accélérogrammes sont ceux générés par Atkinson [Atkinson et Beresnev 1998] pour certaines villes canadiennes. Les villes de l'Est retenues pour la base de données sont Halifax, La Malbaie, Montréal, Ottawa et Québec alors que celles de l'Ouest sont Prince George, Tofino, Vancouver et Victoria (figure 2.9). Un seul couple (M, R) est utilisé pour chaque ville excepté pour Montréal, Québec et Vancouver où deux couples ont été étudiés. Chaque couple (M, R) d'une ville donnée est constitué de quatre accélérogrammes artificiels. On retrouve toutes ces données sismiques dans les tableaux I.3 et I.4.

Pour étudier la décorrélation stochastique de ces signaux (voir chapitre 2.5), on combine,

deux à deux, toutes les composantes artificielles d'un même couple pour créer des séismes à deux composantes horizontales. Grâce à quatre accélérogrammes, on construit six séismes bi-dimensionnels pour chaque site.

On regroupe, là encore, les séismes selon leur géographie (Est ou Ouest) et leur couple (M, R). On distingue ici sept familles de séismes artificiels :

1. À l'Est avec $M_w = 6$ et $R_e = 30$ km : On compte les séismes de Montréal M6, de Ottawa et de Québec M6.
2. À l'Est avec $M_w = 6$ et $R_e = 50$ km : Ce sont les séismes d'Halifax.
3. À l'Est avec $M_w = 7$ et $R_e = 20$ km : On regroupe les séismes de La Malbaie.
4. À l'Est avec $M_w = 7$ et $R_e = 70$ km : On trouve les séismes de Montréal M7 et de Québec M7.
5. À l'Ouest avec $M_w = 6.5$ et $R_e = 30$ km : On compte les séismes de Vancouver M6.5 et de Victoria.
6. À l'Ouest avec $M_w = 6.5$ et $R_e = 50$ km : Ce sont les séismes de Prince George et de Tofino.
7. Enfin à l'Ouest avec $M_w = 7.2$ et $R_e = 70$ km : On regroupe les séismes de Vancouver M7.2.

2.4.4.2 Données de 2009

En ce qui concerne les données synthétiques publiées en 2009 [Atkinson 2009], on ne parle plus de villes. On classe les accélérogrammes selon la situation géographique (Est ou Ouest du Canada), la situation géologique (profilés de sols de type A, C, D ou E), la magnitude (M6 ou M7 à l'Est ou bien M6.5 ou M7.5 à l'Ouest) et par type de faille ("Near Fault" ou "Far Fault"). Pour chacune des catégories de classification, il y a quarante-cinq séismes pouvant être utilisé comme quinze séismes 3D.

Dans notre étude sur le facteur de réduction de force R , on ne prendra pas en compte le

type de faille on aura ainsi quatre-vingt-dix séismes par famille. Les 16 familles utilisées sont donc :

1. À l'Est avec $M_w = 6$ et un type de sol A, C, D ou E.
2. À l'Est avec $M_w = 7$ et un type de sol A, C, D ou E.
3. À l'Ouest avec $M_w = 6.5$ et un type de sol A, C, D ou E.
4. À l'Ouest avec $M_w = 7.5$ et un type de sol A, C, D ou E.

Des données pour une magnitude $M_w = 9$ sont aussi disponibles pour l'Ouest mais ne seront pas étudiées dans ce présent mémoire.

2.5 Décorrélation stochastique de signaux sismiques

Dans les années 1970, des travaux menés à l'université de Berkeley par Penzien et Watabe (1975) ont montré l'existence d'un repère principal pour des secousses sismiques. En considérant l'ensemble des trois enregistrements d'un tremblement de terre (deux directions horizontales et une direction verticale) comme un phénomène stochastique non-stationnaire, on démontre que les axes principaux correspondent aux directions de variances maxima, minima et intermédiaires et que les covariances associées sont nulles.

2.5.1 Matrice d'intensité quadratique

Prenons $a_x(t)$, $a_y(t)$ et $a_z(t)$ les accélérations du sol enregistrées respectivement dans les directions x , y et z . On considère que les accélérogrammes sont corrigés et donc que leur moyenne est nulle. Afin de trouver le repère principal dans lequel les trois signaux auront une covariance nulle, on définit la matrice d'intensité quadratique σ de la forme :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

dont les coefficients σ_{ij} sont définis par :

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} a_i(t) a_j(t) dt ; \quad i = x, y, z ; \quad j = x, y, z \quad (2.13)$$

avec t_0 la durée totale du séisme. Cette matrice d'intensité est symétrique puisque les termes croisés sont égaux. On appelle intensité quadratique de $a_x(t)$ (*resp.* $a_y(t)$, $a_z(t)$) le coefficient σ_{xx} (*resp.* σ_{yy} , σ_{zz}). Ce coefficient est égal au carré de la moyenne quadratique du signal appelé a_{RMS} (voir 2.3.1) et représente par conséquent la sévérité de l'accélération dans la direction x (*resp.* y , z). D'après cette définition, on peut exprimer les coefficients de corrélation γ entre les composantes i et j par :

$$\gamma_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{(\sigma_{ii} \sigma_{jj})}} ; \quad i = x, y, z \quad j = x, y, z \quad (2.14)$$

On démontre que γ_{ij} est compris entre -1 et 1 et que pour $\gamma_{ij} = \pm 1$, les composantes de l'accélération i et j sont parfaitement corrélées.

Cette matrice d'intensité est fortement reliée à l'énergie "directionnelle" du séisme. L'idée est donc de diagonaliser cette matrice pour connaître la direction la plus énergétique (1), la direction la moins énergétique (3) et la direction intermédiaire (2).

2.5.2 Repère principal

Comme pour la matrice des contraintes, on cherche la transformation ϕ de l'espace qui donne une matrice d'intensité diagonale. Cette transformation est représentée par une matrice de passage des accélérations x , y et z aux accélérations principales notées 1, 2 et 3, telle que :

$$\begin{bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ a_3(t) \end{bmatrix} = \phi \begin{bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_z(t) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

où $\phi^T = \phi^{-1}$ est la transposée de la matrice de passage dont les colonnes sont constituées des vecteurs propres de σ (e_1 , e_2 et e_3) :

$$\phi^T = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} e_1^{(x)} \\ e_1^{(y)} \\ e_1^{(z)} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} e_2^{(x)} \\ e_2^{(y)} \\ e_2^{(z)} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} e_3^{(x)} \\ e_3^{(y)} \\ e_3^{(z)} \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Dans ce nouveau repère de l'espace, appelé repère principal de l'accélération sismique et noté \mathfrak{R}_p , la matrice d'intensité est diagonale et vaut :

$$\sigma_p = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

où σ_{11} , σ_{22} et σ_{33} sont les valeurs propres associées aux vecteurs propres e_1 , e_2 et e_3 .

On remarque que dans \mathfrak{R}_p les termes croisés sont nuls. Cela indique bien que les composantes de l'accélération $a_1(t)$, $a_2(t)$ et $a_3(t)$ sont bien décorréliées entre elles. On s'arrangera, dans ce rapport, pour que σ_{11} corresponde à la composante maximale, σ_{22} à la composante intermédiaire et σ_{33} à la composante minimale. Pour des considérations pratiques d'applications de codes de construction, on introduit un nouveau repère \mathfrak{R}' . Ce dernier est constitué d'une composante verticale (V), projection de l'axe principal le plus vertical sur z , et de deux composantes horizontales (H_1 et H_2) projections des deux autres axes principaux dans le plan (x, y) . On s'arrangera, encore une fois, pour que H_1 soit la plus grande composante horizontale (figure 2.10). On remarque que la composante verticale peut être plus énergétique que les composantes horizontales. L'angle entre la direction principale la plus verticale et l'axe z est noté ψ , alors que l'angle de rotation autour de z entre x et H_1 est noté θ .

Dans ce nouveau repère \mathfrak{R}' , les composantes de l'accélération ne sont pas tout à fait décorréliées. Leur matrice d'intensité associée est "*pseudo-diagonale*", c'est à dire qu'elle présente des coefficients croisés petits devant ceux de la diagonale.

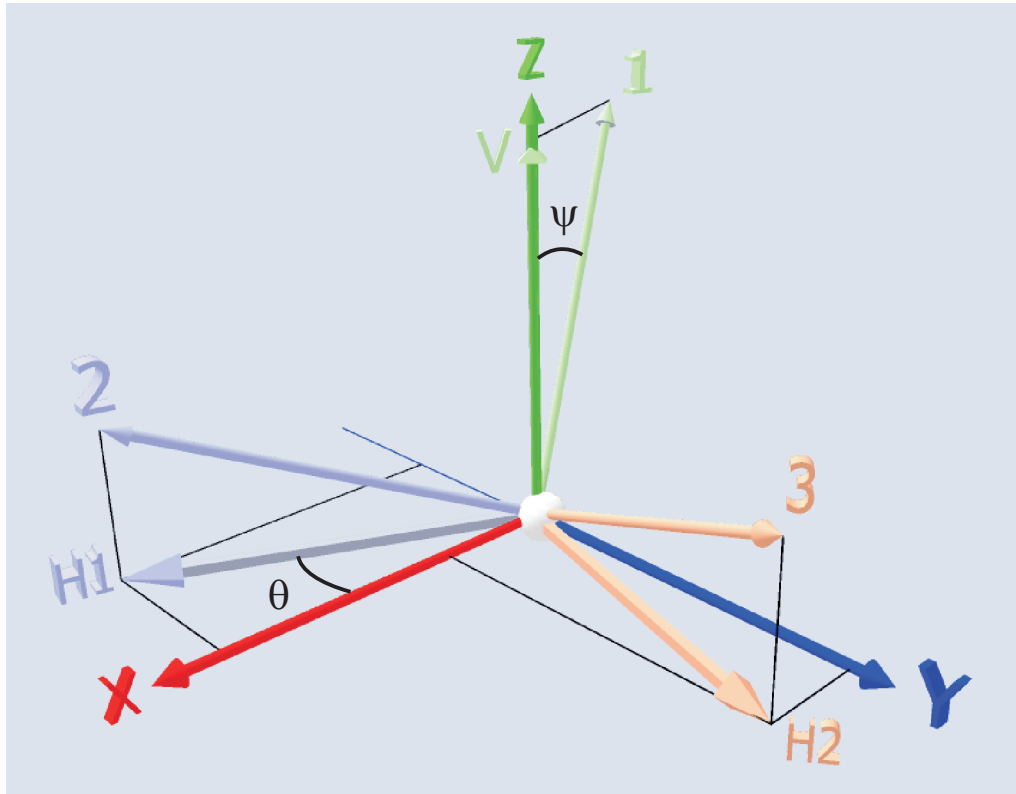


FIG. 2.10 : Repère (x, y, z) de l'enregistrement, Repère principal \mathcal{R}_p $(1, 2, 3)$ et Repère pseudo-principal \mathcal{R}' (H_1, H_2, V) .

2.5.3 Effet de la décorrélation sur les accélérogrammes

Pour comprendre l'effet de la décorrélation sur les signaux, nous allons présenter en détail l'exemple du séisme ($M_s = 6.9$) de Nahanni enregistré à Iverson le 23 Décembre 1985 à 5h16 (NAH1). Le repère dans lequel on a enregistré l'accélération est orienté 10° Nord, son deuxième axe horizontal pointe à 280° Nord et la troisième direction est verticale. Les trois signaux sont représentés sur la figure 2.11 (a). La matrice d'intensité de ce séisme vaut :

$$\sigma = \begin{bmatrix} 30.01 & 6.28 & -8.18 \\ 6.28 & 26.21 & -3.42 \\ -8.18 & -3.42 & 29.63 \end{bmatrix} (\%g)^2 \quad (2.18)$$

Après décorrélation, on trouve la matrice d'intensité suivante :

$$\sigma_p = \begin{bmatrix} 41.20 & 0 & 0 \\ 0 & 24.23 & 0 \\ 0 & 0 & 20.42 \end{bmatrix} (\%g)^2 \quad (2.19)$$

Les directions principales de ce séismes sont tout simplement les vecteurs propres de σ :

$$\phi^T = \left[\begin{pmatrix} 0.6772 \\ 0.4213 \\ -0.6032 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0.1238 \\ 0.7429 \\ 0.6579 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} -0.7253 \\ 0.5202 \\ -0.4509 \end{pmatrix} \right] \quad (2.20)$$

Dans le repère principal \mathfrak{R}_p les accélérations sont transformées (figure 2.11 (b)). On remarque que l'amplitude augmente (*resp. diminue*) si la direction principale est majeure (*resp. mineure*). Dans cet exemple, la composante intermédiaire est l'axe principal le plus vertical (composante selon z égale à 0.6579). Ainsi la projection de cette composante sur z sera la direction pseudo-principale V. L'angle ψ de cet exemple vaut :

$$\psi = \arccos(0.6579) \simeq 49^\circ \quad (2.21)$$

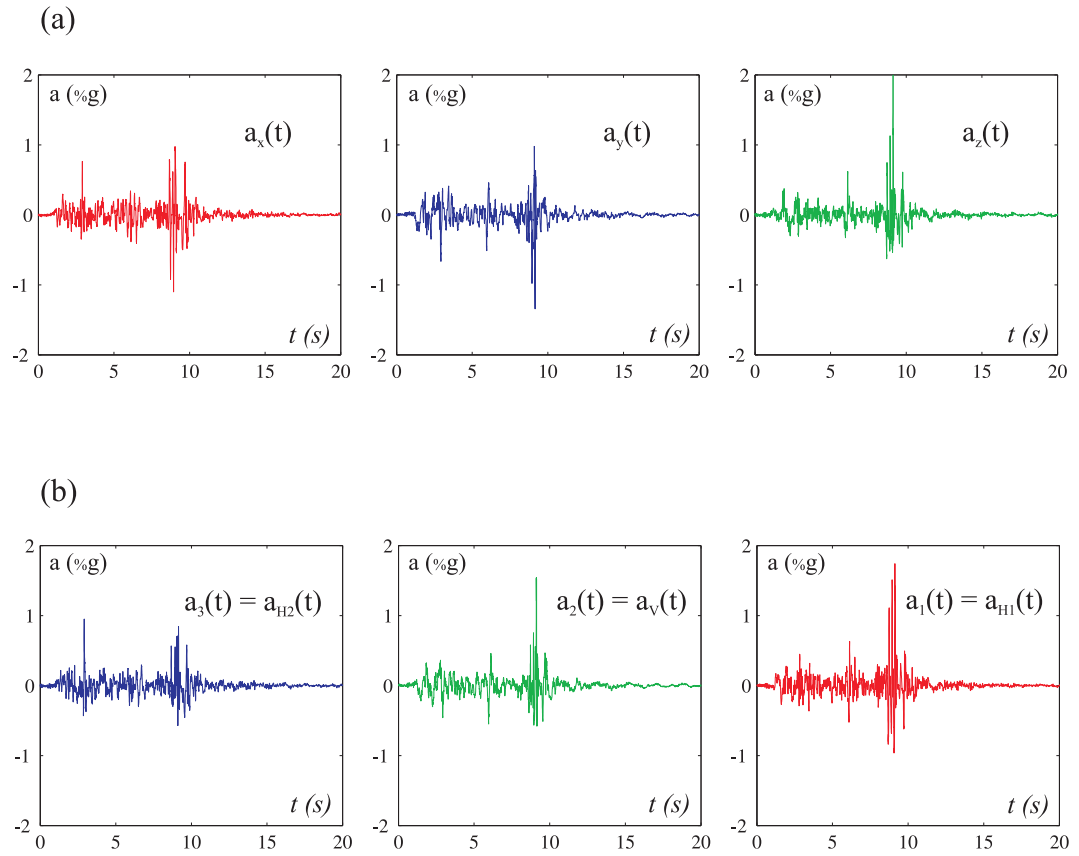


FIG. 2.11 : (a) Accélérogrammes bruts de Nahanni (NAH1 Tableau I.1), (b) Accélérogrammes décorrélés de Nahanni (NAH1).

Les composantes horizontales pseudo-principales seront les projections des composantes majeure et mineure sur le plan (x, y) . Les vecteurs H_1 et H_2 auront pour coordonnées :

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0.6772 \\ 0.4213 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad H_2 = \begin{bmatrix} -0.7253 \\ 0.5202 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Ainsi la valeur de l'angle θ entre x et H_1 vaudra :

$$\theta = \arccos\left(\frac{0.6772}{\sqrt{(0.6772)^2 + (0.4213)^2}}\right) \simeq 32^\circ \quad (2.23)$$

On démontre facilement que l'angle entre les directions H_1 et H_2 vaut 112° . Par conséquent, la composante pseudo-principale horizontale majeure (H_1) de cette secousse a pour orientation -22° Nord et la composante pseudo-principale mineure (H_2) pointe à -134° Nord.

On montrera par la suite que la décorrélation a aussi une influence sur les spectres de réponse. On traitera ce point dans la section 3.3 de ce mémoire.

2.6 Spectres de réponse

2.6.1 Définition d'un spectre de réponse élastique

On appelle spectre de réponse élastique la représentation graphique du maximum d'une variable associée à un *système linéaire* à un degré de liberté (DDL) en fonction de la période de vibration. Cette définition diffère d'un spectre du signal sismique de Fourier car on illustre la réponse sismique d'une structure. On parle de spectre de réponse en déplacement, en vitesse et en accélération, absolu ou relatif. On s'intéressera particulièrement dans ce mémoire, aux spectres, de déplacement relatif (D), de vitesse relative (V) et d'accélération absolue (A).

Grâce à la théorie de la dynamique des structures [Léger 2008] et à l'intégrale de Duhamel

[Chopra 2006], on connaît la réponse exacte en déplacement d'un système à 1 DDL $u(t)$ soumis à une secousse \ddot{u}_g :

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin(\omega_d(t-\tau)) d\tau \quad (2.24)$$

Avec ω_d la pulsation de la réponse dynamique, $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ la pulsation propre (ou naturelle) et ξ l'amortissement du système. Dans ce cas, on obtient la valeur du spectre de déplacement pour la pulsation ω grâce à :

$$D = |u|_{\max} \quad \text{Spectre de déplacement relatif} \quad (2.25)$$

On a de la même façon les valeurs des spectres suivant :

$$\begin{aligned} V &= |\dot{u}|_{\max} && \text{Spectre de vitesse relative} \\ A &= |\ddot{u} + \ddot{u}_g|_{\max} && \text{Spectre d'accélération absolue} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Pour obtenir le spectre complet, il suffit de changer artificiellement les paramètres de rigidité k ou de masse m pour faire varier la fréquence (ou pulsation) ω . Ce spectre caractérise bien l'effet d'un accélérogramme sur la réponse maximum qu'il produit sur un système à un DDL. La figure 2.12 montre un exemple de spectres de réponse pour la secousse du séisme de Miramichi ($M_N = 4.8$) du 31 Mars 1982 enregistré à Holmes Lake (MIR1 Tableau I.1) selon l'azimut 18° Nord. Cet enregistrement sera utilisé pour toutes les illustrations de la suite de ce chapitre.

En génie civil, on travaille généralement avec de faibles amortissements ($\xi \ll 20\%$) ce qui nous permet d'effectuer certaines simplifications. En prenant $\xi \approx 0$ et $\omega_d \approx \omega$ on obtient des relations intéressantes entre les spectres :

$$\begin{aligned} V &= \omega D \\ A &= \omega V = \omega^2 D \end{aligned} \quad (2.27)$$

On parle, dans ce cas, non plus de spectre mais de pseudo-spectre de réponse. Les varia-

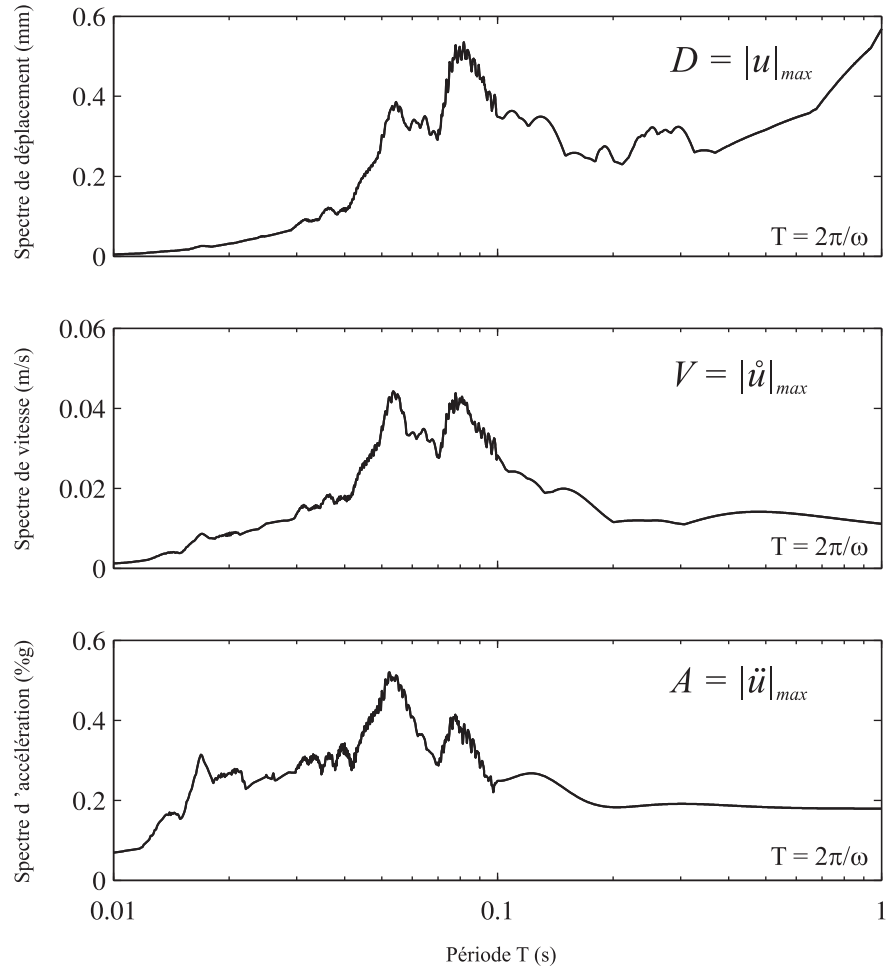


FIG. 2.12 : Spectres de déplacement D , de vitesse V et d'accélération A relatifs de la direction x du séisme de Miramichi (MIR1).

tions entre ces variables sont de l'ordre de grandeur de la précision des analyses sismiques, cependant on ne conseille pas d'utiliser les valeurs du cas simplifié pour un système possédant une période propre élevée ($T \gg 1$). On remarque aussi en général que les pseudo-spectres d'accélération sont plus précis que les pseudo-spectres de vitesse.

Ces spectres servent à bâtir des spectres simplifiés utilisés par les codes de construction. Le principe consiste à approcher le spectre moyen d'une région par des lignes droites. La position de ces lignes dépend de l'aléa sismique d'une région considérée. La figure 2.13 montre des spectres de code national du bâtiment pour les villes de Montréal et Vancouver [Code National du Bâtiment (CNB 2005)].

2.6.2 Spectres non-linéaires

On vient de faire le lien entre spectre élastique et dimensionnement des structures. Les codes de construction utilisent ces informations pour que la structure résiste au cisaillement à la base. Un dimensionnement utilisant les spectres élastiques prévoit que la structure garde un comportement linéaire-élastique tout au long de la sollicitation sismique. Cette hypothèse conduit très souvent à un surdimensionnement des bâtiments. C'est pour cela qu'on s'intéresse au comportement non-linéaire des structures. En effet, laisser la structure se déformer au delà de ces limites élastiques n'est pas systématiquement dramatique. La plastification limite les forces de cisaillement en permettant de plus grands déplacements et des déplacements rémanents. En contrôlant le comportement non-linéaire d'un bâtiment, on peut faire de grandes économies de dimensionnement sans pour autant affecter la sécurité des personnes lors de secousses sismiques.

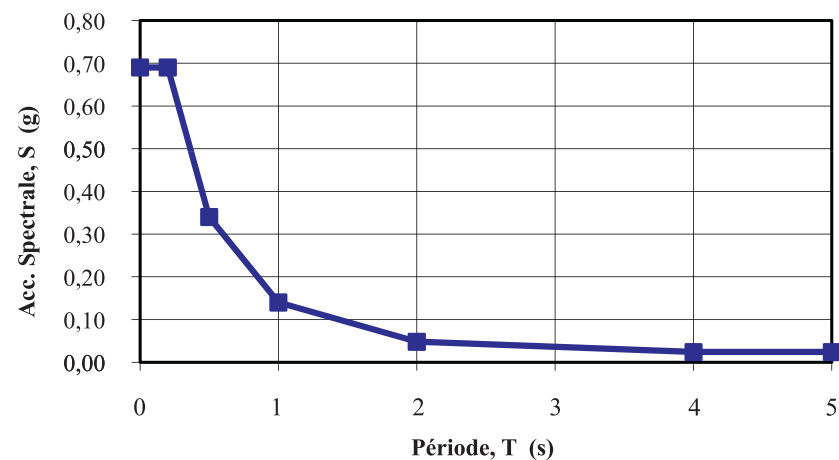
Afin de construire des spectres de réponse non-linéaire, on définit une loi de comportement théorique présentée à la figure 2.14 (a). Cette loi comporte une partie linéaire-élastique et un plateau de plastification. On note u_y (*resp.* f_y) le déplacement maximum (*resp.* la force maximum) pour lequel (*resp.* laquelle) le système reste élastique. On définit ensuite, un système linéaire équivalent ayant les mêmes caractéristiques de masse, de rigidité

(a)

Province : QC - Québec

Catégorie d'emplacement : C

Localité : Montréal



Accélération
spectrale de calcul : $S(T)$
0.5879 g

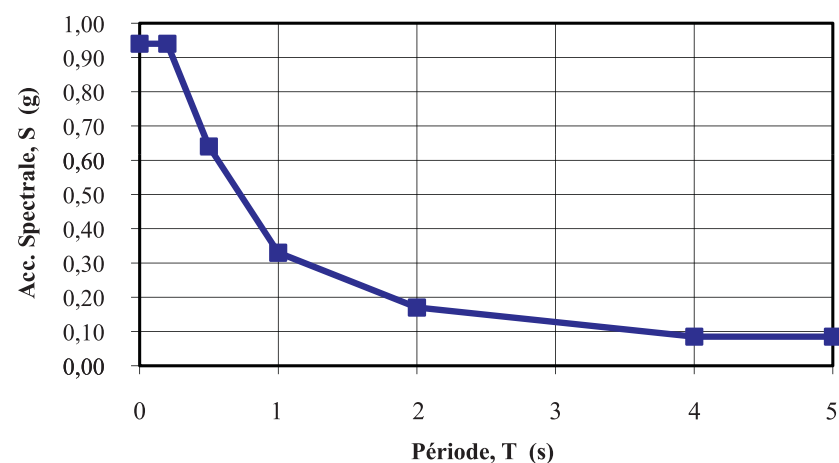
$S_A(0.0)$	$S_A(0.2)$	$S_A(0.5)$	$S_A(1.0)$	$S_A(2.0)$	PGA
0.690 g	0.690 g	0.340 g	0.140 g	0.048 g	0.430 g

(b)

Province : BC - Colombie-Britannique

Catégorie d'emplacement : C

Localité : Vancouver



Accélération
spectrale de calcul : $S(T)$
0.8525 g

$S_A(0.0)$	$S_A(0.2)$	$S_A(0.5)$	$S_A(1.0)$	$S_A(2.0)$	PGA
0.940 g	0.940 g	0.640 g	0.330 g	0.170 g	0.460 g

FIG. 2.13 : Spectre de dimensionnement du code national du bâtiment pour un sol C des villes de Montréal (a) et Vancouver (b) [adapté de Paultre et du CNBC 4.1.8.4 (2005)].

et d'amortissement que notre premier système. On notera u_0 (*resp.* f_0) le déplacement maximum (*resp. la force maximum*) provoqué(e) par une sollicitation sismique. On appelle alors la *force de plastification relative* \bar{f}_y le rapport :

$$\bar{f}_y = \frac{f_y}{f_0} = \frac{u_y}{u_0} \quad (2.28)$$

Cette grandeur varie entre 0 et 1 et représente le pourcentage du système linéaire équivalent pour lequel le système non-linéaire va plastifier. On introduit aussi la variable R_y qui se définit par :

$$R_y = \frac{1}{\bar{f}_y} = \frac{f_0}{f_y} = \frac{u_0}{u_y} \quad (2.29)$$

Pour un système linéaire, les variables \bar{f}_y et R_y sont toutes les deux égales à 1.

Le déplacement maximum en valeur absolue du système élasto-plastique est noté u_m . On introduit, grâce à ce nouveau paramètre, le facteur de ductilité μ :

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} = \frac{R_y u_m}{u_0} = \frac{u_m}{\bar{f}_y u_0} \quad (2.30)$$

La ductilité d'un matériau constitue une propriété intéressante. Plus un matériau est ductile, plus il peut plastifier sans atteindre la rupture. On va donc utiliser cette propriété pour construire de nouveaux spectres de réponse, cette fois non-linéaire. On pourra ainsi réduire les exigences du code en imposant un comportement élasto-plastique.

La réponse d'un système non-linéaire est affectée par la plastification. La figure 2.14 (b) montre les déplacements d'un système pour différentes valeurs de f_y soumis au tremblement de terre de Miramichi (MIR1). On remarque que le maximum de déplacement n'est pas atteint au même moment et que les déplacements rémanents sont différents.

Pour construire un spectre de réponse pour des ductilités données, il faut suivre une méthode de construction itérative [Chopra 2006]. On va détailler dans ce qui suit cette procédure pour un pseudo-spectre d'accélération :

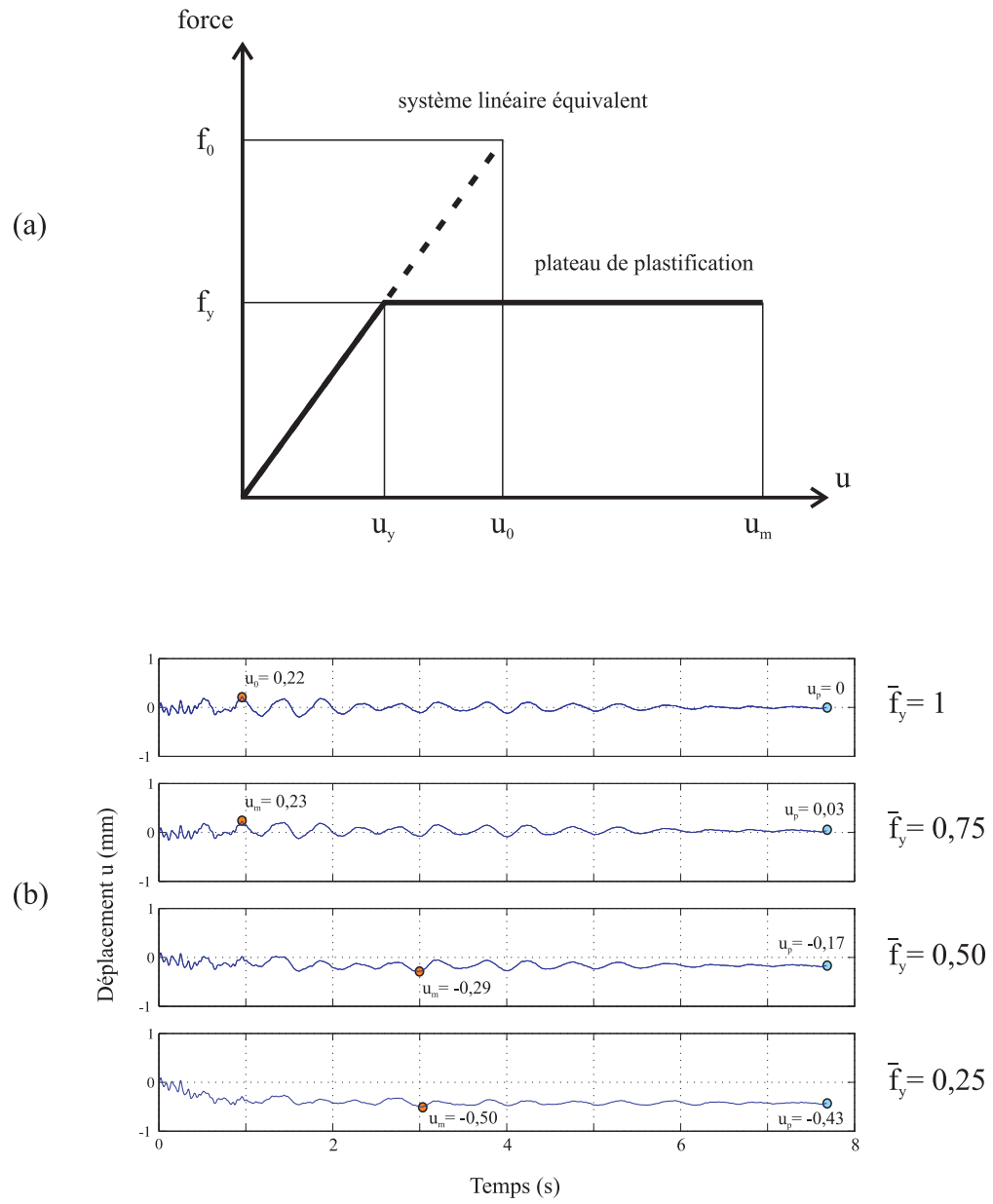


FIG. 2.14 : (a) Loi de comportement du système élasto-plastique et de son système linéaire équivalent, (b) Déplacement d'un système non-linéaire soumis au séisme de Miramichi (MIR1) dépendant de \bar{f}_y .

1. On commence par définir une sollicitation sismique numérique $\ddot{u}_g(t)$.
2. On définit un amortissement ξ , une ductilité μ , une précision de calcul p et un nombre d'itération maximum N pour notre pseudo-spectre. *Dans ce rapport on utilisera $\xi = 5\%$, $\mu = [1; 1.5; 2; 4; 6; 8]$, $p=0.001$ et $N = 20$.*
3. On choisi une période de calcul T_n en modifiant la rigidité k ou la masse m du système.
4. On détermine la réponse $u(t)$ du système linéaire équivalent à l'aide d'un logiciel de calcul de structure. On évalue ensuite les maxima u_0 et $f_0 = k u_0$.
5. On fixe une valeur de $\bar{f}_y < 1$ et l'on détermine la réponse $u(t)$ du système élasto-plastique, ayant une force de plastification de $f_y = \bar{f}_y f_0$, à l'aide d'un logiciel de calcul de structure. À partir de $u(t)$, on déduit le déplacement maximum u_m et la ductilité associée $\tilde{\mu} = \frac{u_m}{\bar{f}_y u_0}$.
6. (a) En fonction de la valeur de $\tilde{\mu}$ trouvée au point 5, on ajuste \bar{f}_y pour converger vers la ductilité μ fixée au point 2. On réitère l'étape 5 tant que $|\mu - \tilde{\mu}| > p$ et que le nombre d'itération est inférieur à N . Dans le cas où il existe plusieurs \bar{f}_y pour une même ductilité, on choisira la plus grande valeur de \bar{f}_y .
 (b) Une fois l'étape 5 (a) validée, on peut trouver la valeur du pseudo-spectre non-linéaire d'accélération $A^{(\mu)}$ grâce à la relation :

$$A^{(\mu)} = \omega^2 D^{(\mu)} = \omega^2 u_y = \omega^2 \bar{f}_y u_0 = \frac{k \bar{f}_y u_0}{m} \quad (2.31)$$

7. On répète le processus des étapes 3 à 6 pour différentes valeurs de T_n pour la même ductilité μ
8. On répète le processus des étapes 3 à 7 pour plusieurs valeurs de ductilité μ

Les pseudo-spectres non-linéaires du séisme de Miramichi (MIR1) sont présentés figure 2.15. Les paramètres de précision et d'itération jouent un rôle important dans la réalisation de tels spectres. Ils peuvent affecter la rapidité et la fiabilité des calculs. Cet aspect de la construction de spectres non-linéaires sera détaillé dans la section 3.2.1.

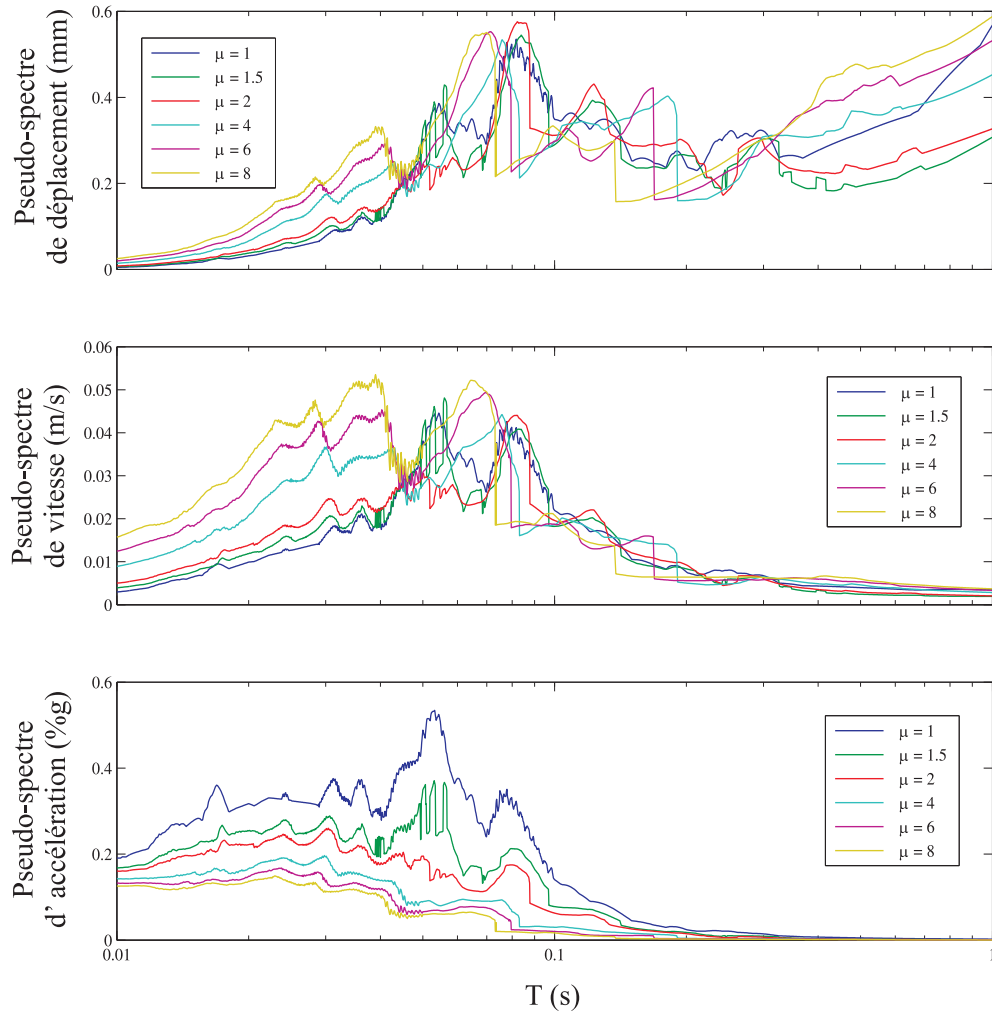


FIG. 2.15 : Pseudo-spectre du séisme de Miramichi (MIR1) pour les ductilités $\mu = [1; 1.5; 2; 4; 6; 8]$.

2.7 Les facteurs de réduction de force sismique

Le Code National du Bâtiment Canadien [CNB 2005] permet de réduire la force sismique équivalente dépendant de la ductilité et de la sur-résistance de la structure. Cette méthode permet un dimensionnement plus économique tout en restant sécuritaire. Ce chapitre va présenter brièvement les notions physiques permettant de réduire la force sismique équivalente et donner des valeurs couramment utilisées selon le système de résistance aux charges latérales.

2.7.1 Rappel de la méthode simplifiée d'analyse sismique du CNBC 2005

Pour des structures régulières, de hauteur raisonnable (voir critères d'application de la méthode simplifiée CNB 2005) le code Canadien permet d'utiliser une méthode simplifiée de calcul du cisaillement à la base. Ce cisaillement est donné par :

$$V = \frac{A(T_a)M_v I_e W}{R_d R_0} \geq \frac{A(2.0)M_v I_e W}{R_d R_0} \quad (2.32)$$

et si le système de résistance demande d'utiliser une valeur de R_d supérieure ou égale à 1.5 alors le cisaillement V ne doit pas dépasser $\frac{2}{3} \frac{A(0.2)I_e W}{R_d R_0}$.

Les termes utilisés sont :

- $A(T_a)$: Valeur du pseudo-spectre d'accélération de dimensionnement en g pour la période empirique de la structure.
- M_v : Coefficient prenant en compte l'effet des modes supérieurs.
- I_e : Facteur d'importance sismique pour la structure.
- T_a : Période fondamentale de vibration de la structure dans la direction d'étude en secondes.
- W : Poids sismique, charge morte de la structure augmentée de 25% de la charge de neige, de 60% de la charge de stockage et de la totalité des contenus des quelconques réservoirs.
- R_d : Facteur de réduction de charge dû à la ductilité de la structure.

– R_0 : Facteur de réduction de charge dû à la réserve de résistance de la structure.

La période empirique est donc la première variable à calculer. Les formules à utiliser dépendent du système de résistance aux charges latérales, des matériaux, de la hauteur du bâtiment h_n et/ou du nombre d'étages N . Ainsi pour une structure ayant une ossature résistant aux moments on utilisera :

$$T_a = 0.085(h_n)^{3/4} \quad \text{pour une structure en acier} \quad (2.33)$$

$$T_a = 0.075(h_n)^{3/4} \quad \text{pour une structure en béton} \quad (2.34)$$

$$T_a = 0.1N \quad \text{pour les autres structures} \quad (2.35)$$

Pour des structures contreventées on utilisera plutôt :

$$T_a = 0.025h_n \quad (2.36)$$

Et pour des bâtiments ayant des murs de refend, on prendra :

$$T_a = 0.05(h_n)^{3/4} \quad (2.37)$$

On pourra utiliser une période de calcul plus importante sans dépasser $1.5T_a$ pour une ossature résistant aux moments ou $2T_a$ pour une structure contreventée ou ayant des murs de refend à condition de vérifier cette période avec une analyse modale.

Une fois le cisaillement à la base calculé, on répartit cette force de façon triangulaire (approximation du premier mode de vibration) sur la hauteur du bâtiment. On applique aussi une force concentrée F_t au sommet de la structure pour prendre en compte l'effet des modes supérieurs. On obtient une répartition de force latérale équivalente à l'étage ℓ suivante :

$$F_\ell = (V - F_t) \frac{W_\ell h_\ell}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} \quad (2.38)$$

avec

$$F_t = \begin{cases} 0.07 T_a V \leq 0.25 V & \text{si } T_a \geq 0.7 s \\ 0 & \text{si } T_a < 0.7 s \end{cases} \quad (2.39)$$

et W_ℓ le poids sismique de l'étage ℓ .

On donne, pour le moment de renversement à l'étage ℓ l'expression suivante :

$$M_\ell = J_\ell \sum_{i=\ell}^n F_i (h_i - h_\ell) \quad (2.40)$$

avec

$$J_\ell = \begin{cases} 1.0 & \text{si } h_\ell \geq 0.6 h_n \\ J + (1 - J) \frac{h_\ell}{0.6 h_n} & \text{si } h_\ell < 0.6 h_n \end{cases} \quad (2.41)$$

où J est le coefficient de réduction du moment dépendant de la géographie (Est ou Ouest), de la période de la structure et du mécanisme de résistance latérale (voir tableau du CNB 2005).

Enfin, on calcule les efforts maximaux dans la structure causés par ce chargement latéral et l'on vérifie les déplacements inter-étages. Cette méthode donne des résultats sécuritaires pour les bâtiments réguliers. Pour d'autres bâtiments, il est obligatoire d'évaluer l'effet de la torsion et d'effectuer une analyse modale ou/et une analyse dynamique.

2.7.2 Le facteur de sur-résistance

On vient de montrer que la méthode simplifiée permettait de réduire le cisaillement à la base grâce au paramètre R_0 . Cet artifice de calcul traduit la surcapacité de la structure. Dans le CNB 2005 [Paultre 2009], on calcul le paramètre R_0 par :

$$R_0 = R_{\text{size}} \times R_\Phi \times R_{\text{yield}} \times R_{\text{sh}} \times R_{\text{mech}} \quad (2.42)$$

- R_{size} est le facteur de surcapacité dû au choix discret des dimensions des barres d'armature. Ceci entraîne généralement des sections arrondies par excès. On le prend égal à 1.05.
 - R_{Φ} est le facteur de surcapacité provenant de la différence entre les résistances nominales et pondérées. Ce facteur vaut $1/\Phi_s = 1/0.85 = 1.18$ puisque la résistance des pièces ductiles est régie par l'acier.
 - R_{yield} est le rapport entre la limite élastique réelle et celle spécifiée sur les dessins de construction. De façon conservateur, on retient la valeur de 1.05
 - R_{sh} est la surcapacité provenant de l'écroutissage de l'acier. Cette valeur dépend beaucoup du confinement du béton mais pour un pourcentage d'armature transversale conseillé par le CNB 2005 on la prendra égale à 1.25 pour les structures ductiles et à 1.10 pour les structures à ductilité modérée.
 - R_{mech} est la surcapacité à la fondation d'un mécanisme de ruine du système structural.
- Les valeurs de ces différents facteurs ainsi que R_0 sont présentées dans le tableau 2.2 selon les systèmes de résistance aux forces sismiques. La figure 2.16 illustre les facteurs de réductions R_0 et R_d .

Tableau 2.2 : Calcul du facteur de surcapacité pour différents systèmes de résistance aux forces sismiques (SRFS) [Paultre 2009].

SRFS	R_{size}	R_{Φ}	R_{yield}	R_{sh}	R_{mech}	R_0
Ossature ductile	1.05	1.18	1.05	1.25	1.05	1.7
Ossature avec ductilité modérée	1.05	1.18	1.05	1.10	1.00	1.4
Ossature conventionnelle	1.05	1.18	1.05	1.00	1.00	1.3
Murs couplés ductiles	1.05	1.18	1.05	1.25	1.05	1.7
Murs couplés partiellement ductiles	1.05	1.18	1.05	1.25	1.05	1.7
Murs ductiles	1.05	1.18	1.05	1.25	1.00	1.6
Murs avec ductilité modérée	1.05	1.18	1.05	1.15	1.00	1.4
Murs conventionnels	1.05	1.18	1.05	1.00	1.00	1.3

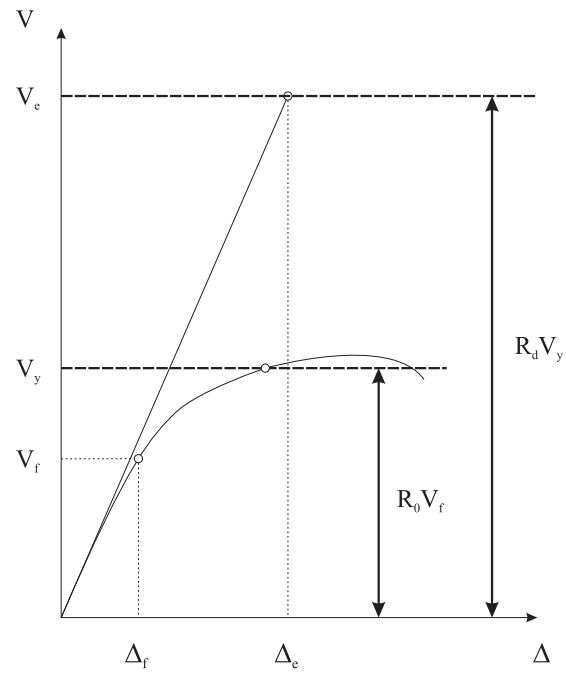


FIG. 2.16 : Graphique force-déformation illustrant les facteurs de réduction de force R_0 et R_d . Légende : $_e$ = relatif au système élastique équivalent ; $_y$ = relatif à la plastification et $_f$ = relatif au dimensionnement (pondéré).

2.7.3 Le facteur lié à la ductilité

Le facteur R_d lié à la ductilité du système, prend en compte la non-linéarité de la structure. En effet, un dimensionnement parasismique permet aux structures de se déformer dans le domaine non-linéaire sans rupture même après plusieurs cycles de chargement. La force sismique maximum V est donc réduite lorsque l'on considère un comportement non-linéaire. On peut évaluer le facteur de réduction de force en formulant des hypothèses sur le comportement inélastique de la structure. Il existe deux hypothèses :

- L'hypothèse des déplacements égaux (HDE) : On observe que les déplacements maximaux d'une structure linéaire et d'une structure non-linéaire soumises au même tremblement de terre sont pratiquement égaux.
- L'hypothèse des énergies potentielles égales (HEPE) : Dans ce cas, on suppose que l'énergie potentielle emmagasinée dans le système élastique est identique à celle emmagasinée dans le système élasto-plastique.

La figure 2.17 illustre ces deux hypothèses. Dans ces deux cas, on peut déterminer l'ex-

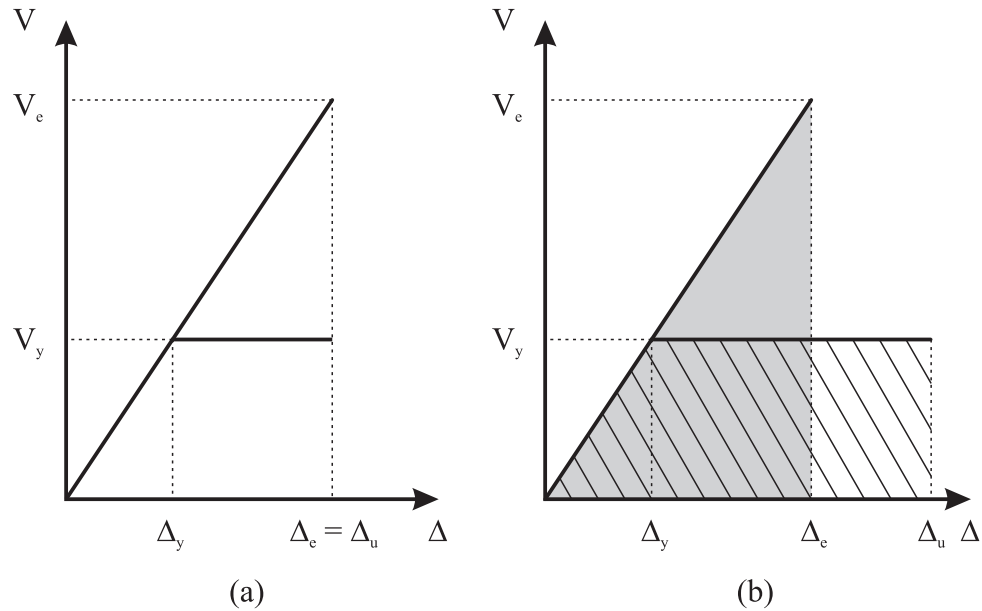


FIG. 2.17 : Réponse de structures à comportement élastique et élasto-plastique dans le cas de l'hypothèse des déplacements égaux (a) et de l'hypothèse des énergies égales (b).

pression théorique du facteur de réduction de force $R = \frac{V_e}{V_y}$. Dans le cas de l'HDE on a la relation suivante :

$$R = \frac{V_e}{V_y} = \frac{k \times \Delta_e}{k \times \Delta_y} = \mu \quad (2.43)$$

Pour l'HEPE, on obtient :

$$\frac{V_e \times \Delta_e}{2} = \frac{V_y \times \Delta_y}{2} + V_y \times (\Delta_u - \Delta_y) \quad (2.44)$$

Ainsi, en remplaçant Δ_e par $\frac{\Delta_y \times V_e}{V_y}$ et en multipliant par 2 l'équation (2.44) on trouve :

$$\frac{(V_e)^2 \times \Delta_y}{V_y} = V_y (2 \Delta_u - \Delta_y) \quad (2.45)$$

$$\left(\frac{V_e}{V_y} \right)^2 = \frac{2 \Delta_u - \Delta_y}{\Delta_y} \quad (2.46)$$

Finalement on a :

$$R^2 = 2\mu - 1 \quad (2.47)$$

$$R = \sqrt{2\mu - 1} \quad (2.48)$$

On note que ces relations ne dépendent pas de la période de vibration du système. Or, on observe dans la pratique, une variation du facteur de réduction de force en fonction de la période de vibration T . On appelle ces relations de réduction de force R - μ - T . Nassar et Krawinkler [Nassar et Krawinkler 1991], proposèrent tout d'abord en 1991, une étude statistique permettant d'évaluer l'influence de la rigidité post-plastification $k' = \alpha k$. Ils développèrent la première relation R - μ - T :

$$R = (c(\mu - 1) + 1)^{\frac{1}{c}} \quad (2.49)$$

avec

$$c = c(T, \alpha) = \frac{T^a}{1 + T^a} + \frac{b}{T} \quad (2.50)$$

et a et b des paramètres dépendant du rapport de rigidité post-plastification et initiale α . Le tableau 2.3 présente les valeurs de a et b que Nassar et Krawinkler ont trouvées pour les différentes rigidités post-plastification.

Tableau 2.3 : Paramètres de régression de Nassar et Krawinkler de l'équation (2.50).

α : Rapport de rigidité	a	b
0%	1.00	0.42
2%	1.01	0.37
10%	0.80	0.29

Plus tard Miranda [Miranda 1993] proposa, lui aussi, une étude approfondie sur les variations du facteur de réduction de force. Sa recherche portait sur l'influence des sols sur le paramètre R . Il énonça trois régressions de la forme $R = \frac{\mu - 1}{\Phi} + 1 \geq 1$, avec Φ valant :

$$\Phi = 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} \exp \left[-\frac{3}{2} \left(\ln T - \frac{3}{5} \right)^2 \right] \quad \text{pour du roc} \quad (2.51)$$

$$\Phi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} \exp \left[-2 \left(\ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right] \quad \text{pour des alluvions} \quad (2.52)$$

$$\Phi = 1 + \frac{T_g}{3T} - \frac{3T_g}{4T} \exp \left[-3 \left(\ln \frac{T}{T_g} - \frac{1}{4} \right)^2 \right] \quad \text{pour des sols mous} \quad (2.53)$$

avec T_g la période propre de vibration du sol mou. Dans le CNB 2005 les types de sol étudiés par Miranda correspondent à :

- Roc : Profilé de sol de type A et B
- Alluvions : Profilé de sol de type C et D
- Sol mou : Profilé de sol de type E

Ces relations R - μ - T n'aboutissent pas aujourd'hui à un choix de R_d différent selon la période de vibration de la structure. Des valeurs dépendant uniquement du système de résistance aux forces sismiques (SRFS) sont utilisées. Le tableau 2.4 présente les valeurs

couramment utilisées dans le CNB 2005.

Tableau 2.4 : Valeurs de R_d et R_0 utilisées dans le CNB 2005 en fonction du système de résistance aux forces sismiques (SRFS). [Adapté du CAC 2006.]

Type de SRFS	R_d	R_0
Cadre rigide ductile	4.0	1.7
Cadre rigide moyennement ductile	2.5	1.4
Murs couplés ductiles	4.0	1.7
Murs partiellement couplés ductiles	3.5	1.7
Murs de cisaillement ductiles	3.5	1.6
Murs de cisaillement moyennement ductiles	2.0	1.4
Construction conventionnelle : Cadre rigide	1.5	1.3
Construction conventionnelle : Murs de cisaillement	1.5	1.3
Autres SRFS	1.0	1.0

2.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'enjeu des recherches en sismologie et en génie parasismique en Amérique du Nord. Il a permis de dégager deux zones à risques au Canada :

- l'Ouest avec des tremblements de terre violents, au contenu fréquentiel bas (grande période de vibration) dont la cause provient de l'activité tectonique entre les plaques Pacifique, Nord-Américaine et Juan de Fuca.
- l'Est présentant des secousses de moindre ampleur, au contenu fréquentiel élevé (courte période de vibration) liées à des champs de contraintes du bouclier Canadien.

On a identifié les risques sismiques grâce aux données historiques. Les indicateurs d'intensité comme le PGA, le RMS, la durée totale de la secousse ou ses magnitudes permettent de quantifier ces risques et de construire des cartes donnant des instructions de construction parasismique.

On a présenté la base de données d'accélérogrammes que l'on traitera dans ce mémoire ainsi que leur classification géographique dépendant du couple (M_w, R_e) .

Dans cette revue de littérature, on a pu détailler le principe de décorrélation stochastique des signaux sismiques. On a montré que cette méthode permettait de construire un repère principal ayant une composante majeure, intermédiaire et mineure. Dans la direction majeure, l'énergie associée à la secousse est maximale. C'est donc une direction critique à analyser pour les bâtiments. Cette méthode a un certain écho dans la communauté scientifique et a tendance à modifier les méthodes d'analyses simplifiées. On utilisera cette méthode pour étudier son effet sur le dimensionnement des structures dans l'Est Canadien.

Ensuite, on a présenté comment construire un spectre linéaire et non-linéaire d'un système à un degré de liberté soumis à un accélérogramme. On a pu se rendre compte de l'utilité de ce genre de graphique pour les analyses dynamiques modales des structures. On a également présenté la notion de spectres de dimensionnement utilisée lors des méthodes simplifiées de calculs parasismiques.

Enfin, on a résumé la méthode simplifiée de dimensionnement sismique du CNB 2005 et présenté les facteurs de réduction de force R_d et R_0 . On a montré qu'il existait des hypothèses de comportement non-linéaire (théorie des déplacements égaux ou des énergies égales) et des relations empiriques R - μ - T permettant d'évaluer le facteur de réduction de charge selon la période, la ductilité, la rigidité post-plastification de la structure ainsi que le type de sol sur lequel est bâti la structure. Le code actuel (2005) ne propose pas de calculer finement les facteurs de réduction de force en utilisant ces relations empiriques. Il se contente de donner des valeurs dépendant uniquement du système de résistance aux forces sismiques.

CHAPITRE 3

SPECTRES SISMIQUES LINÉAIRES

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'accent est mis sur l'étude des spectres linéaires de secousses typiques de l'Amérique du Nord. On détaillera premièrement le fonctionnement d'un outil de calcul développé pour construire automatiquement une base de données de spectres linéaires. On illustrera ensuite l'effet de la décorrélation stochastique sur les spectres de réponse et l'on définira des critères pour mesurer l'importance de ce phénomène. Enfin, on étudiera en profondeur les spectres élastiques du Nord-Est Américain. On définira entre autre les rapports d'amplitude des spectres horizontal et vertical notés respectivement ρ_H et ρ_V afin de comparer l'importance des composantes sismiques selon la situation géographique de la secousse.

3.2 Développement d'un outil automatique de calcul de spectre linéaire

Un des objectifs de ce mémoire est de construire une base de données de spectres de réponse linéaires de plusieurs séismes de l'Est et de l'Ouest Nord-Américain. Bien qu'il existe des logiciels permettant de construire les spectres de réponse d'un séisme, aucun ne permet d'automatiser les calculs de plusieurs accélérogrammes et d'effectuer des opérations statistiques. Un outil de calcul de spectres adapté aux besoins du présent projet a donc été développé.

3.2.1 Principes généraux

L'outil de calcul développé dans le cadre de cette recherche est intitulé RSPECTRUM. C'est une programmation de la procédure de construction du spectre élastique décrite à la section 2.6.1 pour un système masse-ressort-amortisseur illustré à la figure 3.1. On a

utilisé les langages de programmation MATLAB® [Matlab 2007] et TCL&TK® [Welch 2003]. Le principe de l'application est d'utiliser de façon automatisée un utilitaire de calcul des spectres RSPEC [Bouaanani 2005] ou des logiciels d'analyse dynamique des structures comme RUAUMOKO® [Carr 2002], OPENSEES® [McKenna 2000] ou ADINA® [ADINA 2006].

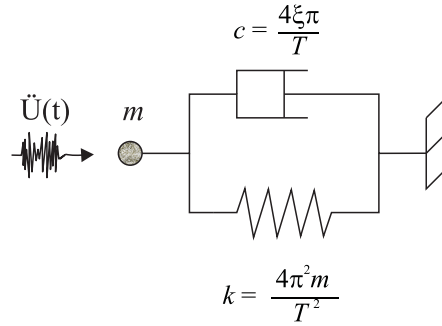


FIG. 3.1 : Système masse-ressort-amortisseur servant au calcul des spectres.

Les fichiers de la base de données des accélérographes doivent respecter le format suivant :

- L'unité de l'accélérogramme doit être en % g.
- Le fichier texte de l'accélérogramme (extension .acc) doit contenir une seule colonne de valeurs d'accélérations et aucune entête.
- Le fichier des données d'accélération doit être accompagné d'un fichier informatif (extension .lfo) donnant la durée du signal (T_{acc}), le pas de temps du signal (dt_{acc}) et le nombre de points du signal (N_{pt}).

La figure 3.2 présente un exemple d'accélérogramme au format RSPECTRUM.

Le programme fonctionne en 3 étapes :

1. Fixation des paramètres des spectres par l'utilisateur :
 - Amortissement modal ξ du système (Dans cette étude, on fixe $\xi = 5\%$).
 - Périodes minimum T_{min} et maximum T_{max} à considérer (On prendra pour la base de données $T_{min} = 0.01$ s et $T_{max} = 10$ s).
 - Incrément de calcul entre périodes ΔT . Il peut être variable pour accélérer les calculs (Dans cette étude, il varie de 0.001 s à 0.1 s, et est multiplié par 10 quand

- la période dépasse une puissance de 10).
2. Calcul de la réponse dynamique : Une fois que les paramètres décrits à la première étape sont introduits par l'utilisateur, le programme calcule les déplacements, vitesses et accélérations maxima pour chaque période en utilisant un logiciel de structure. Pour pouvoir lancer ce logiciel à l'aide de MATLAB ou TCL&TK, il suffit d'écrire les fichiers de commande en intégrant les paramètres de l'utilisateur et de lancer les calculs par un "batch" sous DOS.
 3. Collecte des résultats : Le programme collecte enfin les résultats du logiciel, construit les spectres et pseudo-spectres et peut traiter les données statistiquement.

(a)	(b)
-1.66667E-004	Informations about .acc file : Unit %g
-1.66667E-004	Tacc =
-2.30887E-004	15.26
-2.33180E-004	dtacc =
-2.79817E-004	0.01
....	Npt =
-2.11774E-001	1527
9.25076E-002	
5.90214E-001	
2.86697E-001	
-1.85780E-001	
....	
-8.79205E-004	
-8.63914E-004	
-9.02141E-004	
-8.86850E-004	
-4.92355E-005	

FIG. 3.2 : (a) Extrait d'un fichier texte de données de l'accélérogramme (signal.acc), (b) Fichier informatif associé (signal.1fo).

3.2.2 Exemple d'utilisation

L'exemple suivant illustre la procédure de calcul pour un pseudo-spectre d'accélération en utilisant le logiciel RUAUMOKO [Carr 2002] et l'utilitaire de calcul MATLAB. On souhaite trouver la valeur du pseudo-spectre élastique ($\mu = 1$) de l'accélérogramme d'azimuth 18° de Miramichi (MIR1) pour une période de $T = 0.5$ s et un amortissement de $\xi = 5\%$.

1. On introduit le nom de l'accélérogramme et les paramètres de l'utilisateur dans le fichier MATLAB illustré à la figure 3.3
2. Le programme recopie le fichier de commande de RUAUMOKO (Elas.inp) en y intégrant les nouveaux paramètres (figure 3.4). Il lance ensuite RUAUMOKO.
3. Enfin le programme lit les résultats dans le fichier Elas.out et identifie le maximum de déplacement. Il construit alors le pseudo-spectre selon la formule (2.27).

```

function []= Run()
% function []= Run()
% Bayle Valentine Stagiaire & Blasco Benjamin Élève en maitrise
clear;clc;
Processus = 'BRUT_';
seism = 'Miramichi1982';
dir='ENR';
site='1';
% Spectra Settings
format long;
xi1 = 0.05;
Tmin = 0.5;
Tmax = 0.5;
Tstep = 0.01;
Tol = 0.001;
% .acc Settings
INFO = strcat('./Seismes/',seism, '/Site',site, '/',Processus,'S',site,'_',dir,'.ifo');
ACC = strcat('./Seismes/',seism, '/Site',site, '/',Processus,'S',site,'_',dir,'.acc');
Temp = fopen(INFO); % info file of .acc file
emp=fgetl(Temp);
emp=fgetl(Temp);
Tacc=fscanf(Temp,'%g /n',1);
emp=fgetl(Temp);
dtacc=fscanf(Temp,'%g /n',1);
fclose(Temp);
% RUN PROGRAMM
SpectrumNEW(xi1,Tmin,Tmax,Tstep,Tol,Tacc,dtacc,ACC,seism,dir,Processus);
end

```

} Nom de l'accélérogramme

} Caractéristiques du spectre

} Lecture des caractéristiques de l'accélérogramme

FIG. 3.3 : Exemple de fichier à compléter par l'utilisateur pour lancer le programme RSPECTRUM.

Notre utilitaire permet de calculer une grande gamme de spectres élastiques très rapidement. On présente une capture d'écran de RSPECTRUM utilisant la programmation TCL&TK et le programme de structure développé par Bouaanani RSPEC à la figure 3.5.

3.2.3 Validation de l'outil de calcul

Avant d'être utilisée pour constituer notre base de données, l'application RSPECTRUM doit être validée. On se concentre tout d'abord sur les déplacements trouvés par les logiciels de structure lancés à partir de RSPECTRUM en régime élastique. On choisit dans notre

```

Elas, (Units: kN, m, sec)
2 1 0 0 0 0 2 0 0 0
2 2 2 0 0 0 9.81 0 0 0 (0.005) (7.68) 1
0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0
15 0 0.0001 0 0 0 10 1 0 0 0.1

! Principal Analysis Option
! Frame Control Parameters
! Output Intervals and Plotting Control
! Iteration Control and wave velocities

NODES 2
1 0 0 1 1 1 0 0 0
2 1 0 0 1 1 0 0 0

! Base
! Top
} Géométrie du système

ELEMENTS 2
1 1 1 2 0 0
2 2 1 2 0 0

! spring
! damper

PROPS
1 SPRING
1 0 0 0 (157.914) 0 0 0 0 0 0 0 0
2 DAMPER
0 (12.5664) 0 0 0 0

! Section Properties
! (12a) Basic section proprieties
! (14)

WEIGHTS
1 0 0 0
2 9.810 0 0

! Seismic Weights (kN)
! Base
! Top

LOADS
1 0 0
2 0 0

! Base
! Top

EQUAKE C:\Recherche\Matlab\Seismes\Miramichi1982\Site1\Brut_S1_ENR.acc
2 7 0.005 981 1 0 0 1

```

FIG. 3.4 : Exemple de fichier de commande du logiciel RUAUMOKO pour $T = 0.5$ s et $\xi = 5\%$.

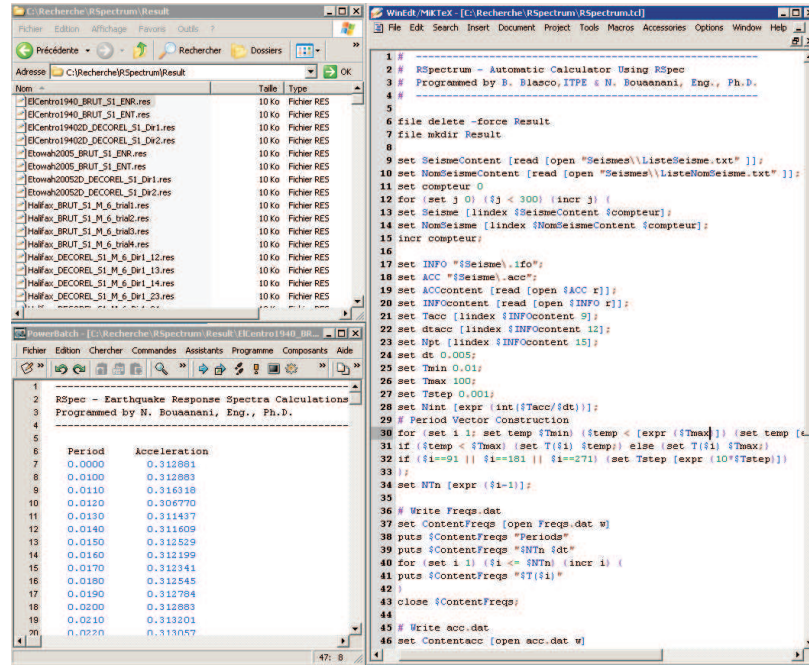


FIG. 3.5 : Capture d'écran de RSPECTRUM utilisant TCL&Tk et RSpec.

cas, de les comparer aux résultats du logiciel de structure ADINA [ADINA 2006]. Après quelques rectifications touchant aux coefficients d'intégration de Newmark et aux pas de temps d'intégration dt , on trouve des réponses quasi-identiques. La figure 3.6 illustre cette vérification pour les déplacements d'un système à 1DDL ayant une période de 0.5 s soumis au séisme de Loma Prieta (LOM) dans la direction x avec les logiciels RUAUMOKO et OPENSEES.

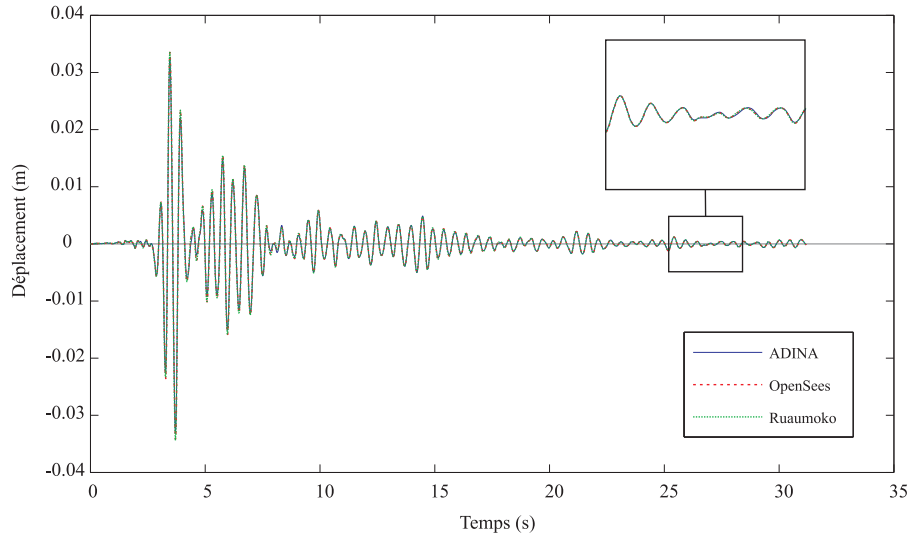


FIG. 3.6 : Comparaison avec ADINA des déplacements élastiques calculés par RUAUMOKO et OPENSEES via RSPECTRUM.

Il reste désormais à valider l'automatisation de la construction de spectres élastiques. Les logiciels de calcul de spectres SEISMOSIGNAL et BISPEC ont été choisis comme témoins. La figure 3.7 compare quelques spectres de notre base de données (chacun d'une famille de couple (M, R) différente voir paragraphe 2.4.3), obtenus par nos témoins et par RSPECTRUM fonctionnant avec OPENSEES. On remarque que nos résultats sont très similaires à nos deux témoins. Le logiciel SEISMOSIGNAL ne permet pas de calculer avec un pas précis pour les très petites périodes, cependant nos résultats concordent de façon très satisfaisante avec BISPEC. On valide ainsi notre outil automatique de calcul.

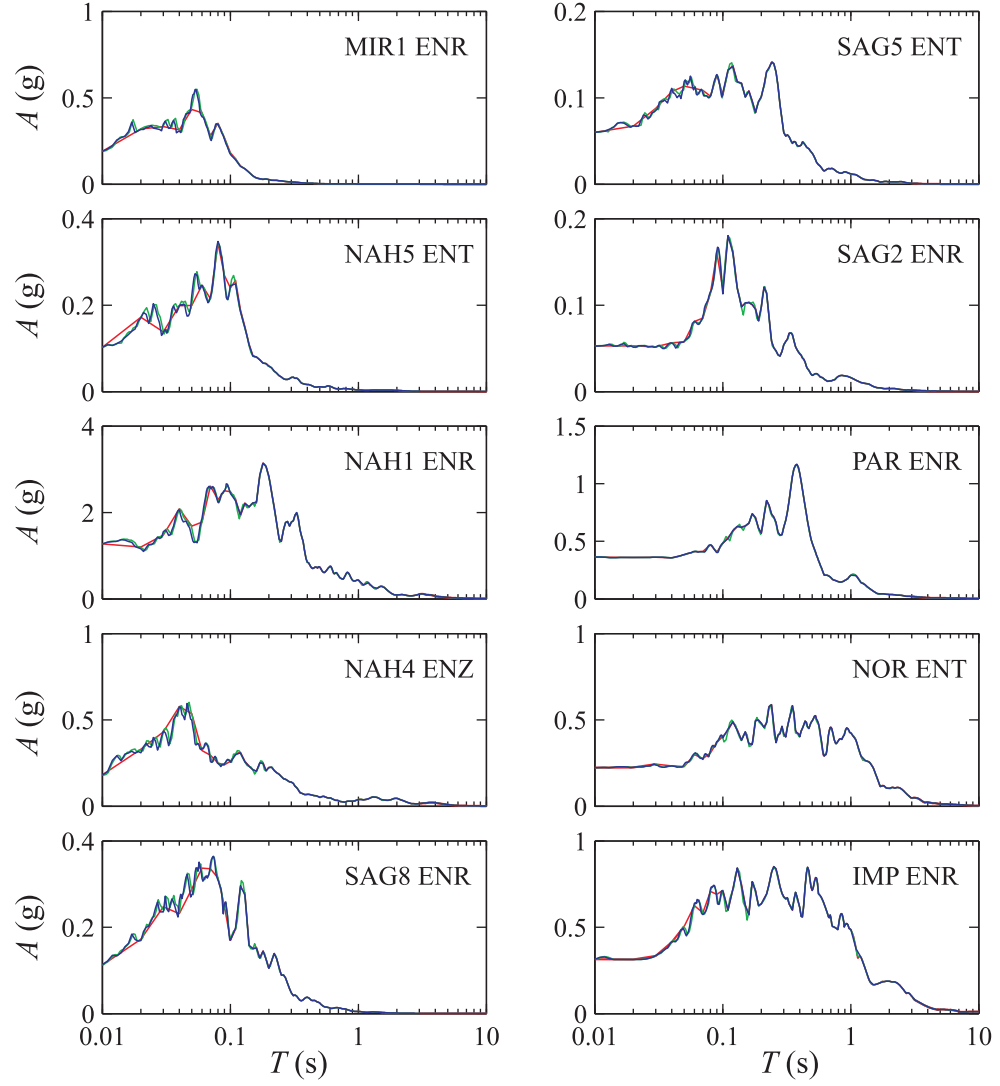


FIG. 3.7 : Comparaison des pseudo-spectres élastiques calculés par *RSPECTRUM* avec des logiciels témoins : *Légende : bleu = RSPECTRUM ; rouge = SEISMOSIGNAL et vert = BISPEC.*

3.3 Effet de la décorrélation sur les spectres linéaires

En s’inspirant des travaux de López (2006), on souhaite visualiser les effets de la décorrélation sur les spectres de réponse linéaires. Pour chaque séisme historique et artificiel, les pseudo-spectres principaux ont été calculés. Ils sont partiellement présentés dans l’annexe II.

3.3.1 Effet sur les composantes horizontales

On remarque plusieurs effets de la décorrélation sur les composantes horizontales des spectres :

- La décorrélation a tendance à séparer les spectres verticalement. Les figures II.1 et II.2 avec les séismes historiques suivants MIR5, NAH5, NAH4, PAR, NOR ou IMP illustrent bien cet effet. Dans une moindre mesure la figure II.3 avec MAL3, QUE7 VIC5, TOF et VAN présente la même caractéristique pour les séismes synthétiques.
- Elle réarrange simplement les deux directions horizontales lorsque le repère est déjà pratiquement principal. C’est le cas présenté sur les figures II.1 et II.3 pour les séismes SAG8, SAG4, OTT6 et HAL2.

La figure 3.8 schématise ces deux phénomènes. On note que la séparation des spectres est nettement plus importante pour les séismes historiques que pour les séismes synthétiques. Cela montre que les séismes historiques présentent une corrélation initiale plus grande. Afin d’étudier l’influence de la direction verticale sur les composantes horizontales des spectres, on propose de décorréler les séismes historiques selon 2 dimensions (horizontalement). On représente sur la figure 3.9, la comparaison entre des spectres 2D et 3D. On remarque, dans le cas où la composante verticale est mineure ou majeure (NAH3, LOM et MIR2), que l’influence du vertical est négligeable. Par contre, lorsque la direction verticale est intermédiaire, il y a une grande différence entre les spectres 2D et 3D. Dans la plupart des cas, la composante verticale est mineure ou plus rarement majeure, on pourra alors étudier les spectres horizontaux séparément. On s’intéressera plus tard à caractériser les spectres verticaux par rapport aux horizontaux.

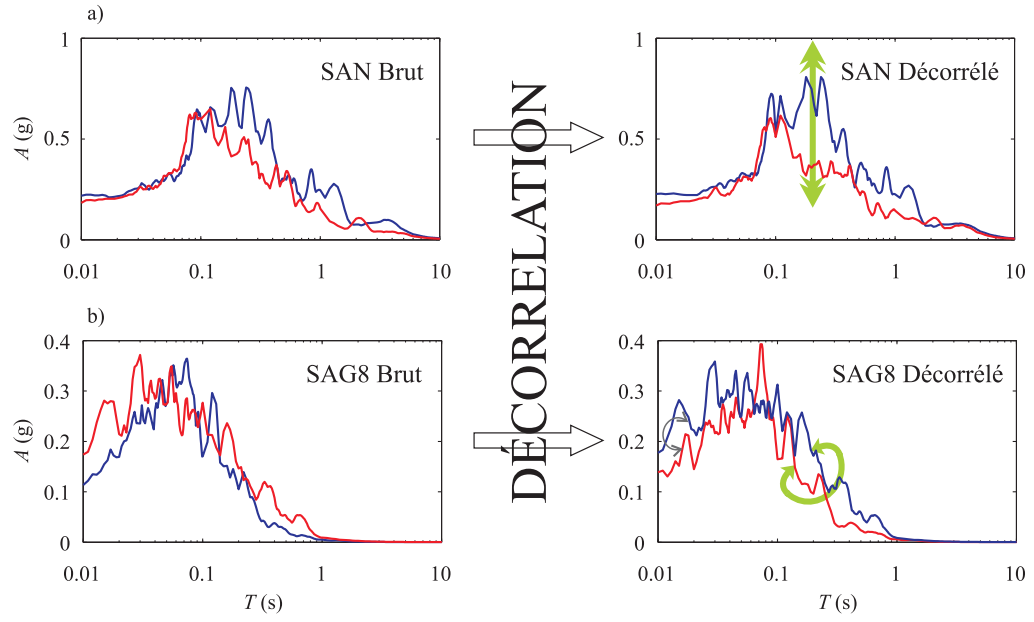


FIG. 3.8 : Schématisation des effets de la décorrélation sur les spectres élastiques horizontaux. a) Effet de séparation des spectres, b) Effet d'inversion des directions horizontales : *Légende : bleu = direction x ou H_1 et rouge = direction y ou H_2*

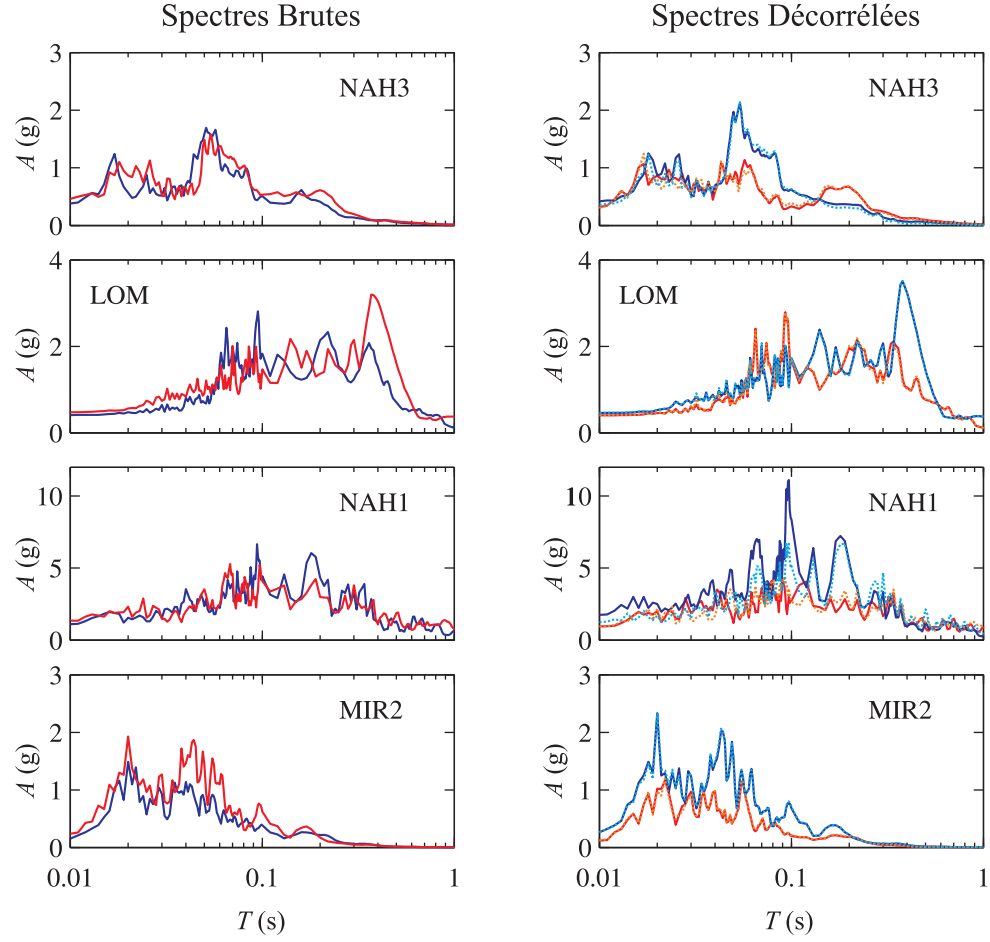


FIG. 3.9 : Comparaison de spectres décorrés selon 2 directions et 3 directions : *Légende : bleu = direction x ou H_1 ; rouge = direction y ou H_2 ; trait continu = spectre brut ou décorré 2D ; trait pointillé = spectre décorré 3D*

3.3.2 Effet sur la composante verticale

La décorrélation stochastique affecte aussi la composante verticale des secousses sismiques. En effet, si cette dernière a une intensité importante par rapport aux composantes horizontales, autrement dit si c'est une composante majeure ou intermédiaire, la décorrélation a tendance à réduire fortement son spectre élastique. Les séismes NAH1 et NAH5 présentés à la figure II.1 permettent de se rendre compte de ce phénomène. Dans le cas où la composante verticale est mineure les spectres sont légèrement réduits. Par conséquent, le processus de décorrélation et la projection dans le repère pseudo-principal tend à diminuer la composante verticale du spectre élastique.

3.3.3 Développement de critère d'influence de la décorrélation

Afin de quantifier l'effet de la décorrélation, l'idée est de développer des critères d'influence notés τ_{inv} pour l'inversion des directions horizontales, τ_h pour l'écartement horizontal et τ_v pour la réduction verticale. Ces paramètres sont définis par :

$$\tau_{inv} = \text{signe}[\int_0^{10} (A_x - A_y)(A_1 - A_2) dT] \quad (3.1)$$

$$\tau_h = \frac{\int_0^{10} |A_1 - A_2| dT}{\int_0^{10} |A_x - A_y| dT} \quad (3.2)$$

$$\tau_v = \frac{\max(A_V)}{\max(A_z)} \quad (3.3)$$

avec A_1 , A_2 et A_V les spectres décorrélés dans les directions H_1 , H_2 et V , et A_x , A_y et A_z les spectres bruts dans les directions x , y et z . Les tableaux 3.1 et 3.2 illustrent les valeurs de ces indices d'influence pour les séismes historiques et artificiels. On note tout d'abord que la décorrélation a un effet d'inversion des directions horizontales lorsque $\tau_{inv} = -1$. L'indice τ_h quantifie l'écartement entre les spectres horizontaux ; $\tau_h > 1$ lorsque il y a écartement et $\tau_h \leq 1$ lorsqu'il y a un rétrécissement. De la même façon, l'indice τ_v illustre le rehaussement du spectre quand $\tau_v > 1$, ou son abaissement quand $\tau_v \leq 1$.

On remarque qu'un peu moins de la moitié des séismes (46.5%) ont subi une inversion entre x , y et H_1, H_2 après la décorrélation. On montre bien qu'il n'y a pas de direction privilégiée pour la composante principale. On note aussi que la décorrélation a tendance à écarter les spectres horizontaux ; 65.5% des spectres ont été écartés pour 34.5% resserrés. De plus, le phénomène de séparation des spectres est plus important ; L'écartement moyen est de 43.1% alors que le resserrement moyen est de seulement 18.4%. En ce qui concerne l'effet sur la composante verticale, on peut conclure que la décorrélation stochastique tend à réduire le spectre verticale ; 74% des spectres ont été réduits pour 26% rehaussés. L'abaissement vertical est aussi de plus grande amplitude avec en moyenne une réduction de 18.4% pour seulement 2.7% de rehaussement.

Grâce à ces critères, on caractérise bien les effets observés de la décorrélation stochastique. Cette dernière a tendance à séparer les spectres horizontaux, à réduire le spectre vertical et inverse une fois sur deux les composantes x , y avec H_1, H_2 . On vient de montrer que le repère principal, commun à tout séismes, amplifie les écarts d'amplitude entre les composantes. Il sera donc intéressant de caractériser les spectres élastiques dans ce repère pour étudier l'influence des rapports d'amplitude entre les différentes directions.

3.4 Caractérisation approfondie des spectres élastiques principaux

On s'attarde désormais à caractériser les spectres élastiques de séismes orientés selon leurs axes principaux. On commence par présenter et étudier les spectres moyens des groupements par couple (M, R). Puis on calculera les rapports d'amplitude entre les spectres horizontaux en fonction de la période. On discrétisera ensuite l'ensemble des périodes en plages de vibration correspondant à certain type de bâtiments afin de calculer le rapport moyen d'amplitude selon ces plages. À la fin de cette partie, on étudiera de la même manière le rapport d'amplitude du spectre vertical. Enfin, on procédera à une analyse comparative précise des spectres élastiques de la base de données.

Tableau 3.1 Indices de décorrélation τ_{inv} , τ_h et τ_v pour les séismes historiques.

Séisme	τ_{inv}	τ_h	τ_v	Séisme	τ_{inv}	τ_h	τ_v
EST				OUEST			
$M_w \leq 5.7$ $R_e \approx 5$				$M_w \leq 6.8$ $R_e = 10$			
MIR1	-1	0.961	1.079	PAR	1	1.249	1.005
MIR2	-1	1.657	0.994	$M_w \leq 6.8$ $R_e = 20$			
MIR3	-1	0.846	0.796	SAN	1	0.824	0.988
MIR4	-1	0.942	0.976	NOR	1	0.891	1.008
MIR5	-1	1.555	0.947	$M_w > 6.8$ $R_e = 10$			
NAH2	1	0.913	0.590	LOM	-1	0.983	0.947
NAH3	1	1.874	0.745	IMP	1	1.246	0.994
$M_w \leq 5.7$ $R_e \approx 20$							
ETO	-1	1.328	1.002				
NAH5	1	1.520	0.813				
$M_w > 5.7$ $R_e \approx 5$							
NAH1	1	2.218	0.591				
$M_w > 5.7$ $R_e \approx 20$							
NAH4	1	0.442	0.790				
$M_w > 5.7$ $R_e \approx 50$							
SAG8	-1	1.059	1.071				
SAG9	1	0.992	0.990				
$M_w > 5.7$ $R_e \approx 90$							
SAG10	-1	0.807	1.003				
SAG4	-1	0.990	0.919				
SAG5	1	0.876	0.913				
$M_w > 5.7$ $R_e > 90$							
SAG1	1	1.306	0.956				
SAG2	-1	1.024	0.858				
SAG6	-1	0.774	0.725				
SAG7	-1	1.136	0.868				
SAG11	1	0.954	0.910				

Tableau 3.2 Indices de décorrélation τ_{inv} et τ_h pour les séismes artificiels.

Séisme				τ_{inv}	τ_h	Séisme				τ_{inv}	τ_h
EST						OUEST					
$M_w = 6$ $R_e = 30$	MON1	-1	1.135			$M_w = 6.5$ $R_e = 30$	VAN1	-1	0.871		
	MON2	1	1.591				VAN2	-1	1.025		
	MON3	-1	1.052				VAN3	1	0.799		
	MON4	1	1.554				VAN4	-1	0.685		
	MON5	1	1.164				VAN5	1	1.210		
	MON6	-1	1.163				VAN6	1	0.776		
	OTT1	-1	1.205				VIC1	-1	0.872		
	OTT2	1	1.506				VIC2	-1	1.024		
	OTT3	-1	1.104				VIC3	1	0.802		
	OTT4	1	1.658				VIC4	-1	0.685		
	OTT5	1	1.241				VIC5	1	1.216		
	OTT6	-1	1.241				VIC6	1	0.775		
	QUE1	-1	1.135			$M_w = 6.5$ $R_e = 50$	PRI1	-1	1.172		
	QUE2	1	1.591				PRI2	1	1.007		
	QUE3	-1	1.052				PRI3	1	0.866		
	QUE4	1	1.554				PRI4	1	1.212		
	QUE5	1	1.164				PRI5	1	1.007		
	QUE6	-1	1.163				PRI6	-1	0.421		
$M_w = 6$ $R_e = 50$	HAL1	1	1.124				TOF1	-1	1.172		
	HAL2	-1	1.260				TOF2	1	1.007		
	HAL3	-1	1.073				TOF3	1	0.866		
	HAL4	-1	1.066				TOF4	1	1.212		
	HAL5	-1	1.132				TOF5	1	1.007		
	HAL6	-1	1.161				TOF6	-1	0.421		

Tableau 3.2 Indices de décorrélation τ_{inv} et τ_h pour les séismes artificiels (suite).

Séisme		τ_{inv}	τ_h	Séisme		τ_{inv}	τ_h
EST				OUEST			
$M_w = 7$ $R_e = 20$	MAL1	1	0.937	$M_w = 7.5$ $R_e = 70$	VAN7	1	0.977
	MAL2	1	1.107		VAN8	1	0.922
	MAL3	1	1.234		VAN9	1	0.923
	MAL4	1	0.736		VAN10	-1	1.045
	MAL5	-1	1.202		VAN11	1	1.001
	MAL6	-1	1.002		VAN12	1	1.337
$M_w = 7$ $R_e = 70$	MON7	1	1.173				
	MON8	1	1.027				
	MON9	1	1.075				
	MON10	-1	0.945				
	MON11	-1	1.176				
	MON12	-1	1.425				
	QUE7	1	1.173				
	QUE8	1	1.027				
	QUE9	1	1.075				
	QUE10	-1	0.945				
	QUE11	-1	1.176				
	QUE12	-1	1.425				

3.4.1 Spectres moyens élastiques en fonction du couple (M, R)

On cherche ici à regrouper les spectres élastiques selon les mêmes critères que ceux décrits aux paragraphes 2.4.3 et 2.4.4. Cette classification permettra de dégager des caractéristiques sismiques typiques en fonction de la géographie et du couple (M, R). Afin de comparer les spectres, on décide de les mettre à la même échelle par la méthode du pic d'accélération, (en anglais PGA-scaling). Ce spectre sans unité est appelé spectre normalisé et est noté \bar{A} . Il est défini pour un séisme j par :

$$\bar{A}_{ij}(T) = \frac{A_{ij}(T)}{A_{H1j}(0)} ; \quad i = H_1, H_2 \text{ ou } V \quad \text{pour les séismes décorrélés} \quad (3.4)$$

$$\bar{A}_{ij}(T) = \frac{A_{ij}(T)}{\max(A_{xj}(0), A_{yj}(0))} ; \quad i = x, y \text{ ou } z \quad \text{pour les séismes bruts} \quad (3.5)$$

où $A_{ij}(0)$ représente le PGA du séisme j et T la période. Le spectre majeur normalisé a, par définition, une valeur unitaire en zéro. On peut ainsi faire une moyenne sur l'ensemble de N séismes d'un même groupement m . On note \bar{A}_{im} le spectre moyen dans la direction i défini par :

$$\bar{A}_{im}(T) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{A}_{ij}(T) ; \quad i = H_1, H_2, V, x, y \text{ ou } z \quad (3.6)$$

Les figures 3.10, 3.11, 3.12 et 3.13 illustrent les spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Est et de l'Ouest décorrélés et bruts.

On remarque tout d'abord que l'effet de la décorrélation est toujours visible. Il y a séparation des spectres horizontaux et abaissement du spectre vertical même pour les spectres moyens. On note que les spectres moyens historiques de l'Ouest présentent des valeurs maximales similaires à ceux de l'Est. Bien que le paragraphe 2.4 stipule que les accélérations historiques maximales de l'Ouest sont plus fortes que celles de l'Est, les spectres normalisés ne permettent pas de visualiser cette caractéristique. Par contre, ils illustrent bien le domaine spectral riche en basse fréquence de l'Ouest. En effet, les spectres moyens de l'Ouest s'étalent sur une grande gamme de périodes, de 0.1 à 6 secondes, alors que les

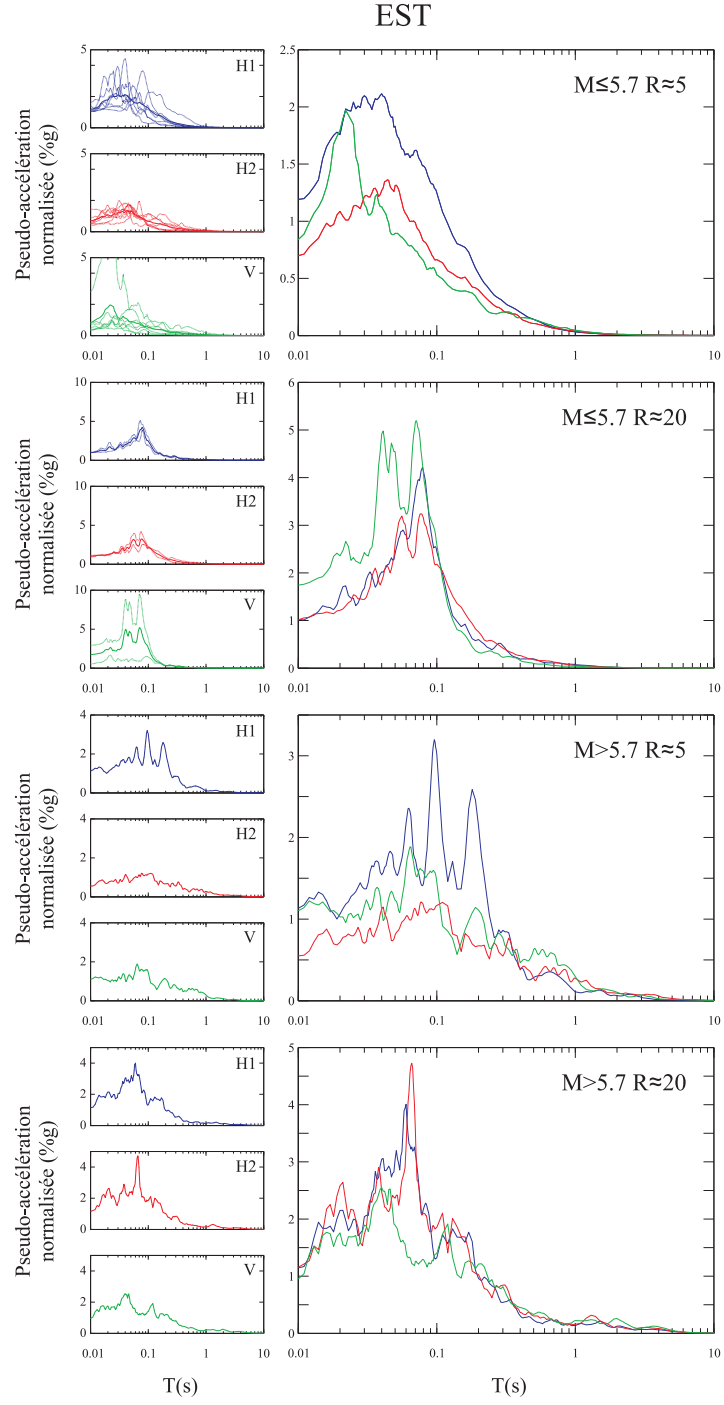


FIG. 3.10 : Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Est décorrélés.

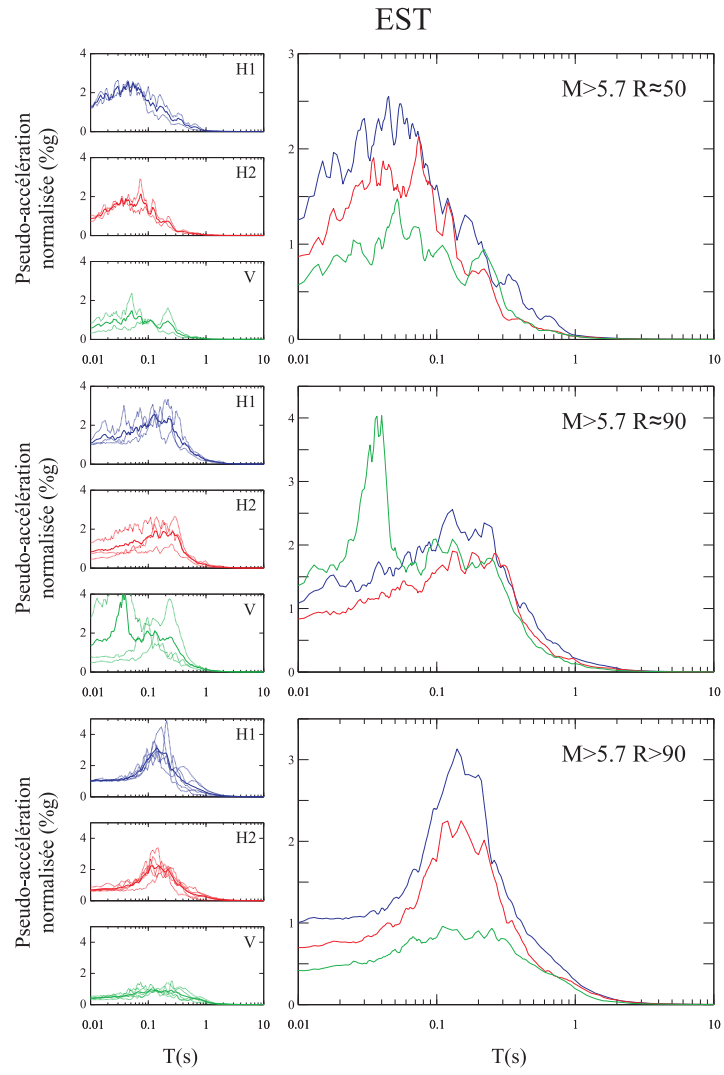


FIG. 3.10 : Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Est décorrélés (suite).

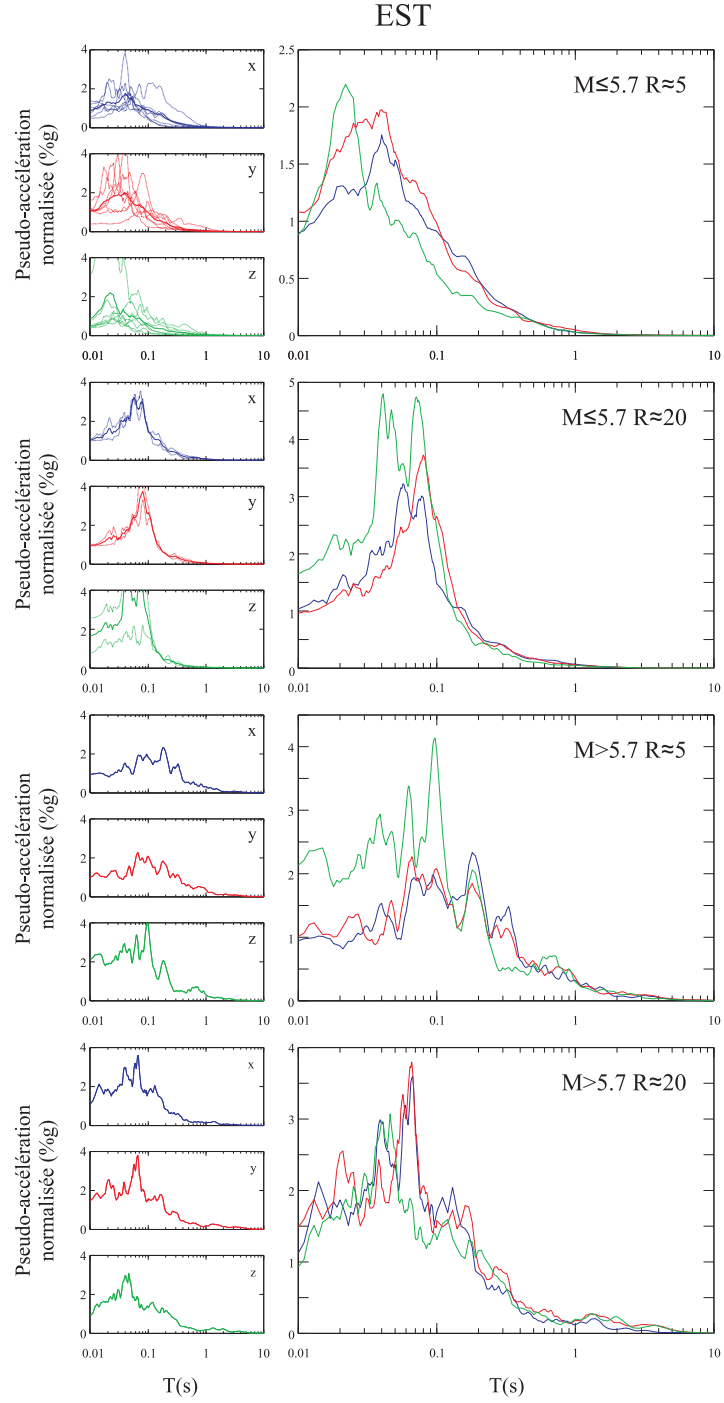


FIG. 3.11 : Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Est bruts.

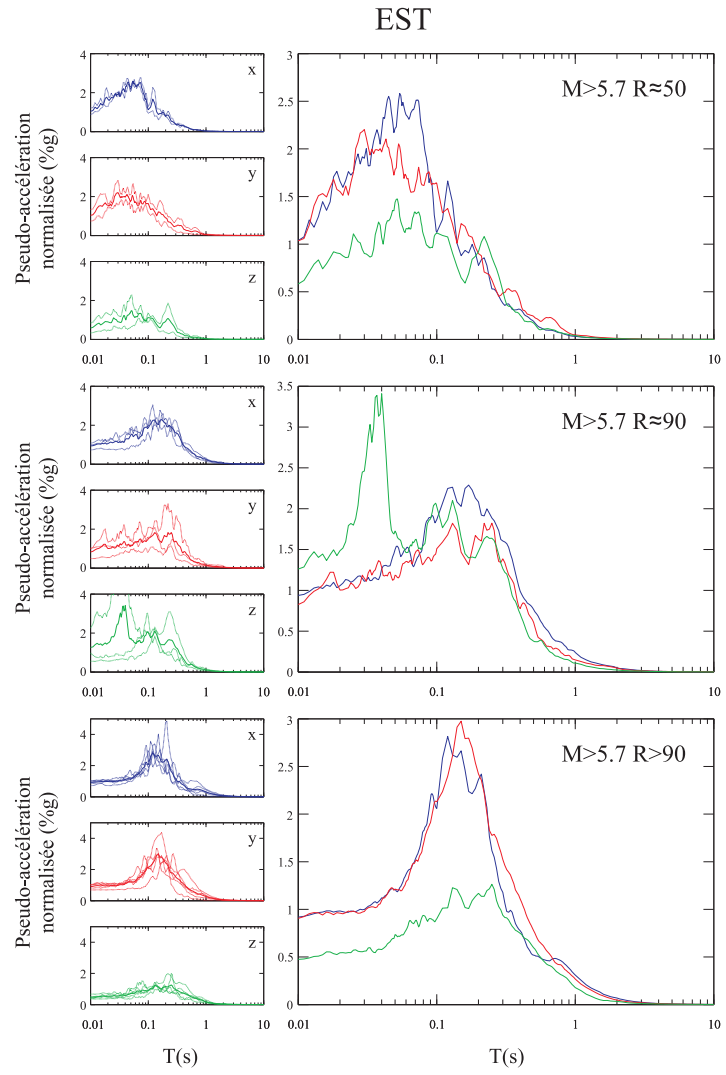


FIG. 3.11 : Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Est bruts (suite).

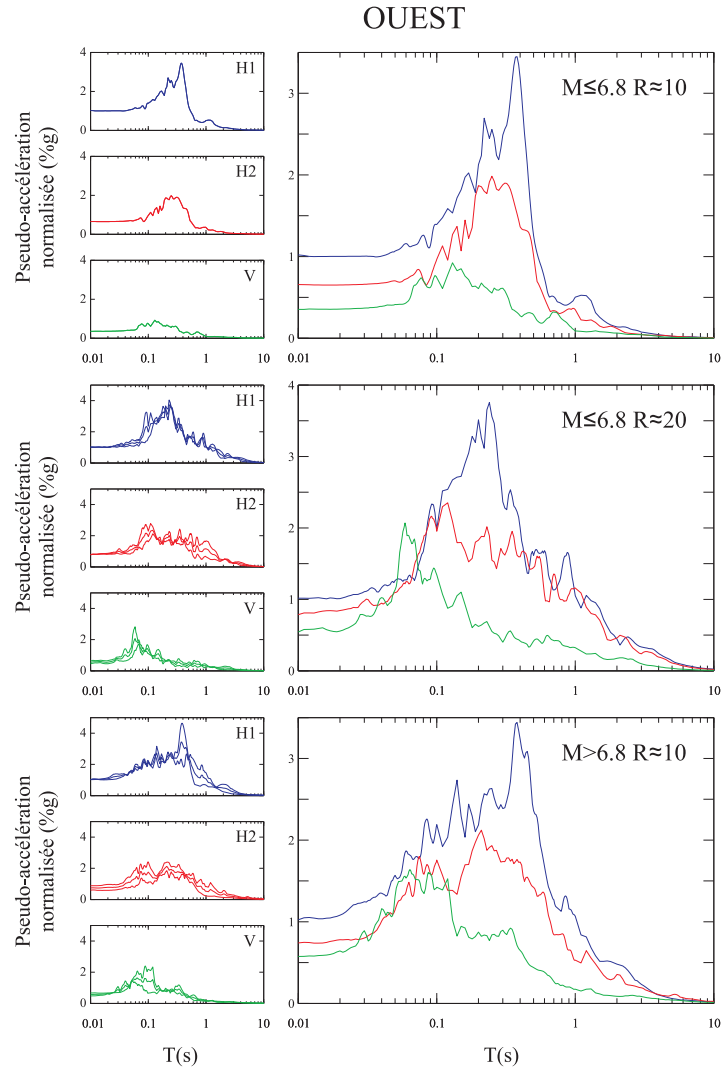


FIG. 3.12 : Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Ouest décorrélés.

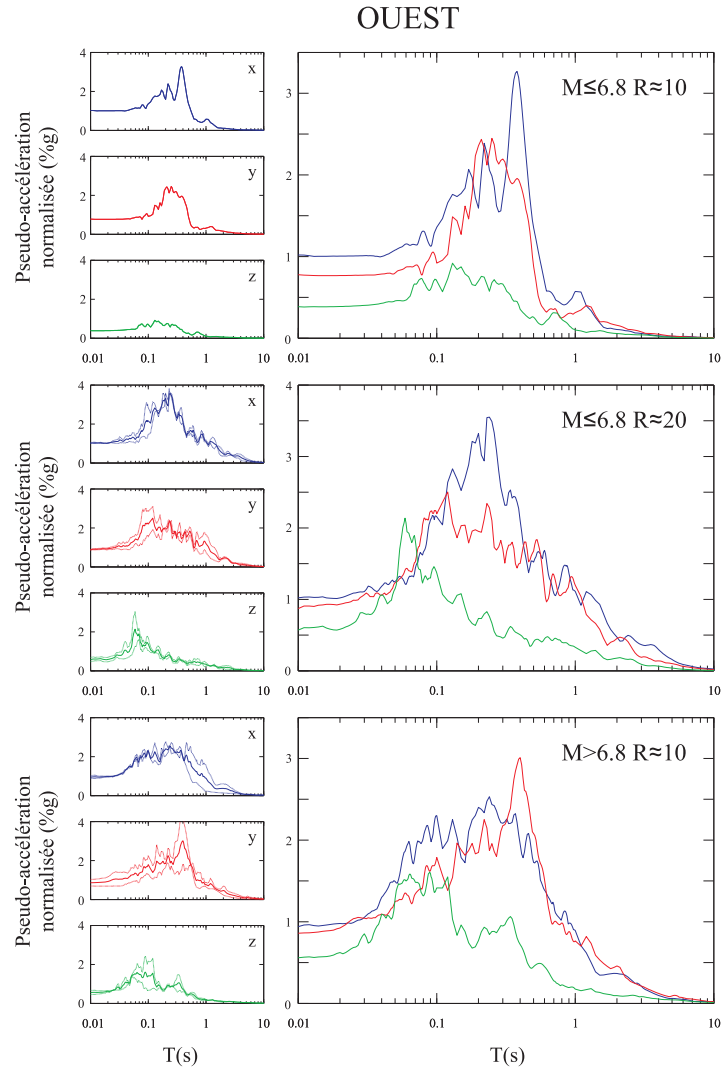


FIG. 3.13 : Spectres moyens élastiques des séismes historiques de l'Ouest bruts.

spectres moyens de l'Est sont concentrés entre 0.01 et 1 seconde. Les composantes verticales des spectres moyens de l'Est sont généralement plus élevées que celles de l'Ouest. On observera par la suite que cette caractéristique se traduit par des rapports verticaux d'amplitude à l'Ouest plus faible qu'à l'Est (voir section 3.4.3). De façon générale, ces composantes verticales présentent des pics dans les petites périodes. À l'Ouest, on remarque qu'au delà de 0.1 seconde ces composantes deviennent faibles alors qu'à l'Est elles restent de l'ordre des autres spectres. López (2006) trouve des résultats similaires dans ces travaux sur l'Ouest. Il obtient des spectres verticaux présentant des pics en basse période pour des enregistrements à proximité de failles géologiques et des spectres verticaux faibles sur toute la gamme de périodes pour des sites éloignés de discontinuités géologiques.

Ces observations sont également valables pour les spectres moyens artificiels. On présente les spectres élastiques moyens des séismes synthétiques de l'Est et de l'Ouest décorrélés et bruts sur les figures 3.14, 3.15, 3.16 et 3.17. On illustre toujours les effets de la décorrélation. On remarque là encore que l'Ouest présente un domaine fréquentiel plus large décalé vers les hautes périodes. Cependant, on note que les valeurs spectrales maximales normalisées de l'Est sont légèrement supérieures à celle de l'Ouest. On retient aussi que les composantes spectrales sont plus espacées à l'Ouest qu'à l'Est. Ceci se traduira par un rapport horizontal d'amplitude plus faible à l'Ouest.

On ne peut pas vraiment déduire de caractéristiques sur le spectre moyen en fonction de la distance épacentrale ou de la magnitude. Les tendances ne sont pas assez prononcées par rapport à la taille de notre échantillon pour conclure sur une corrélation en fonction de (M, R) . Désormais, on va se concentrer sur les rapports d'amplitude des spectres élastiques entre les directions horizontales puis sur les rapports d'amplitude des spectres élastiques entre la direction verticale et la direction majeure horizontale.

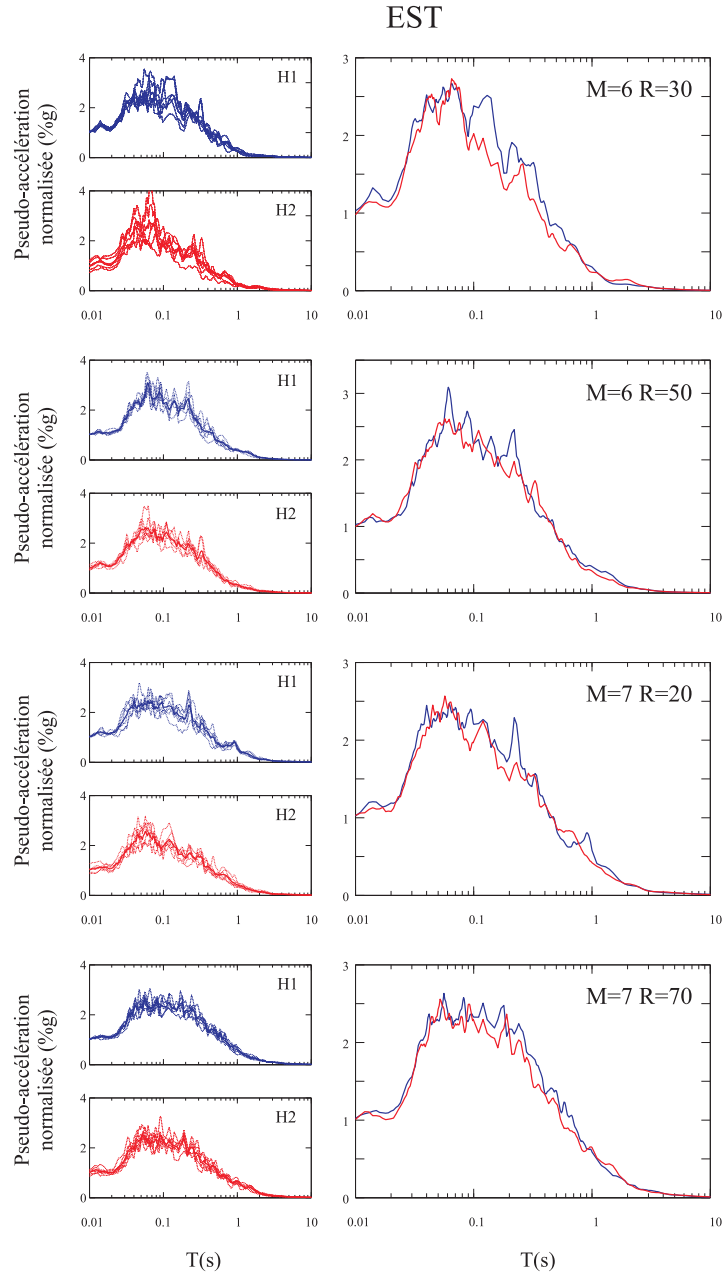


FIG. 3.14 : Spectres moyens élastiques des séismes synthétiques de l'Est décorrélés.

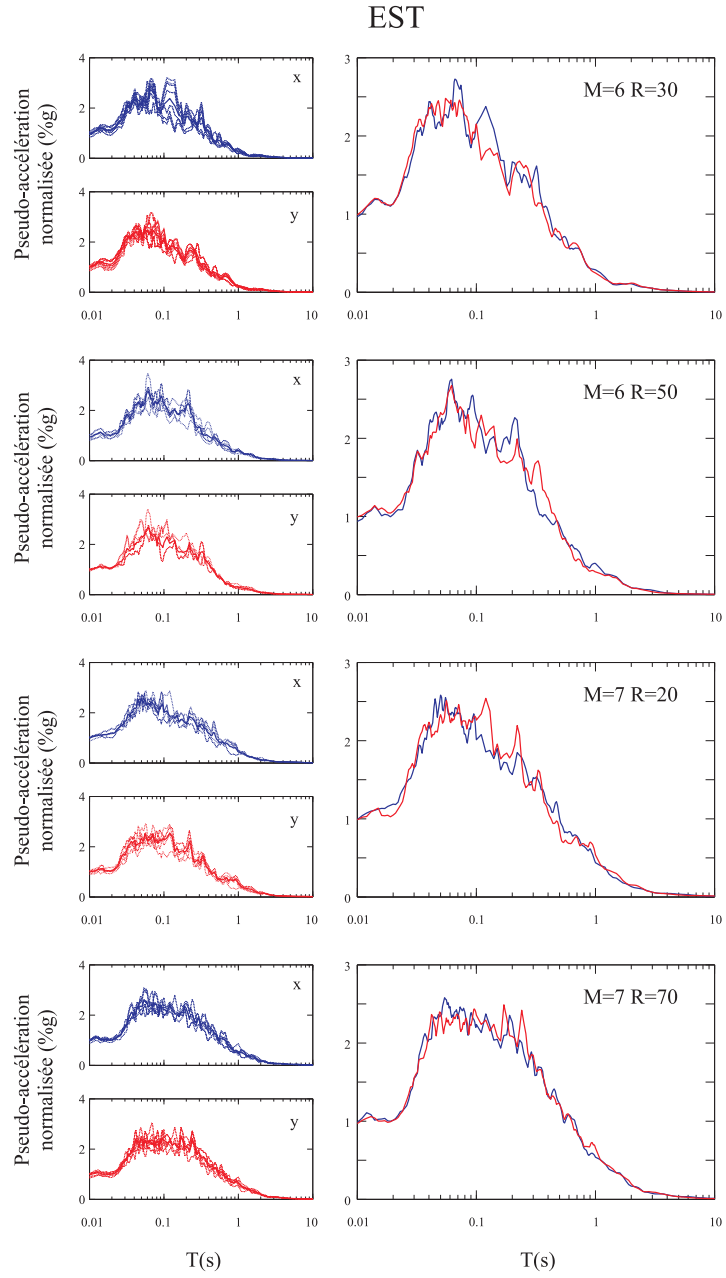


FIG. 3.15 : Spectres moyens élastiques des séismes synthétiques de l'Est bruts.

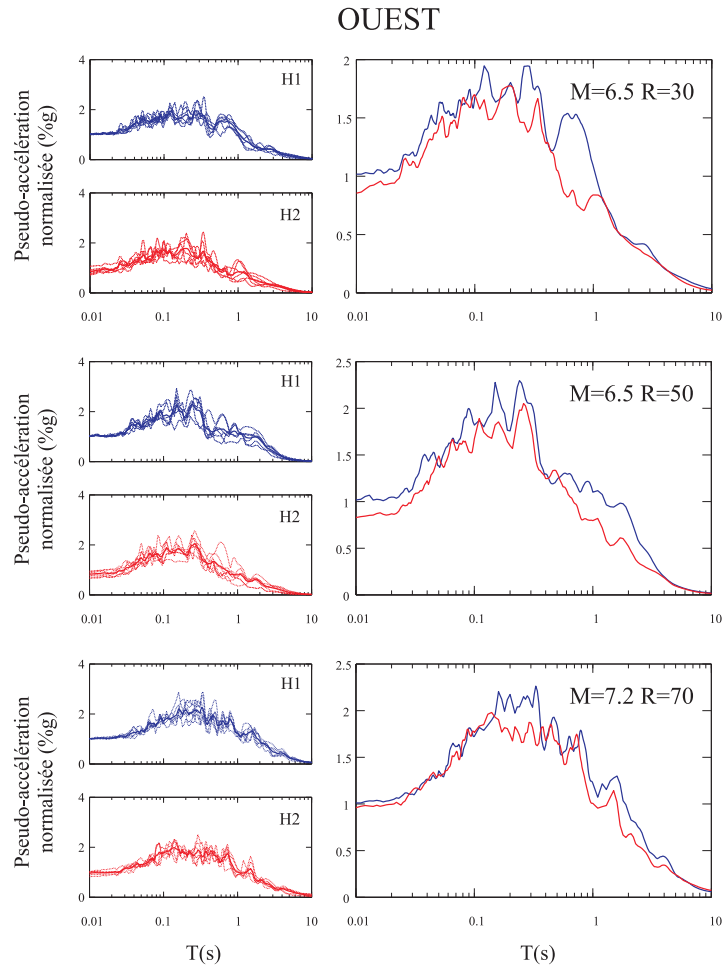


FIG. 3.16 : Spectres moyens élastiques des séismes synthétiques de l'Ouest décorrélés.

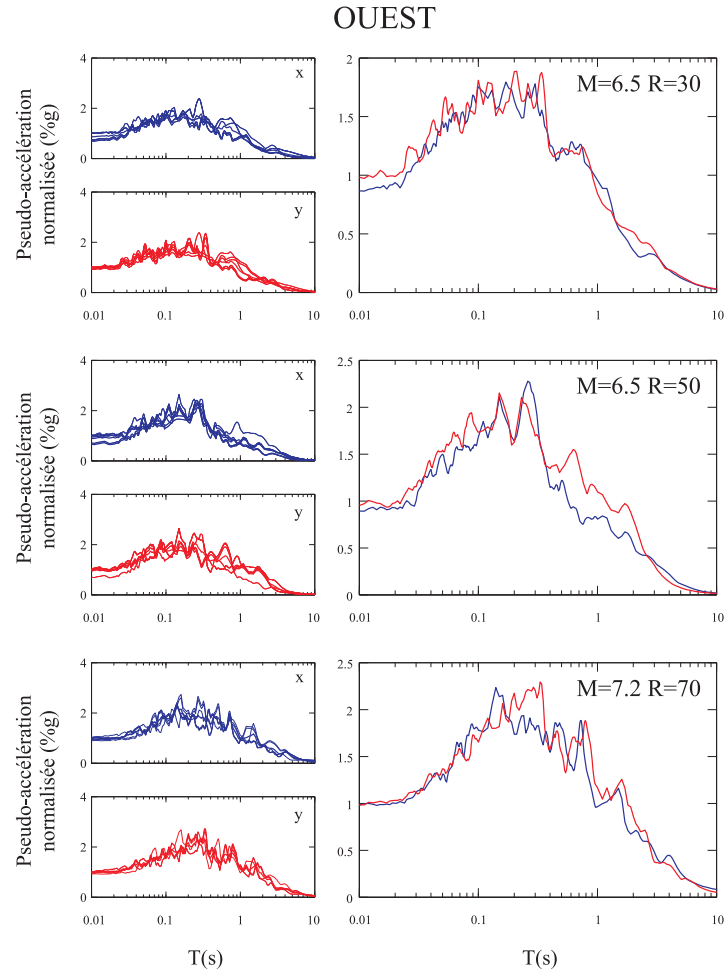


FIG. 3.17 : Spectres moyens élastiques des séismes synthétiques de l'Ouest bruts.

3.4.2 Rapports d'amplitude de spectres élastiques horizontaux (RASEH)

En génie civil, on porte un intérêt particulier au rapport d'amplitude des spectres dépendant des directions. Autrement dit, on souhaite connaître l'ordre de grandeur de l'accélération spectrale dans une direction connaissant celle de la direction majeure. Un rapport proche de 1 indique que les accélérations spectrales sont équivalentes dans les deux directions. On préconise, dans ce cas, une analyse détaillée prenant l'effet du couplage de la sollicitation dans deux directions. Ceci revient souvent à faire un dimensionnement plus robuste que s'il n'y avait qu'une seule excitation dans une direction. On étudie, tout d'abord, le rapport d'amplitude spectral des directions horizontales ρ_H en fonction de la période (RASEH). Ce paramètre est défini par :

$$\rho_H(T) = \frac{A_{H_2}(T)}{A_{H_1}(T)} \quad (3.7)$$

Où A_{H_1} , et A_{H_2} sont respectivement les pseudo-accélérations spectrales horizontales dans la direction majeure et mineure. Étant donnée la variabilité de ce nouveau paramètre et son sens physique, on propose deux définitions de rapports moyens selon la période. L'une étant basée sur la simple moyenne du rapport $\rho_H(T)$ entre les périodes T_i et T_j que l'on notera $\overline{\rho_H}([T_i..T_j])$ et l'autre définie comme le rapport des spectres moyens entre T_i et T_j , notée $\tilde{\rho}_H([T_i..T_j])$. On appellera respectivement $\overline{\rho_H}$ et $\tilde{\rho}_H$, les RASEH moyens basic et modifié. On obtient les relations suivantes :

$$\overline{\rho_H}([T_i..T_j]) = \text{moyenne}(\rho_H(T), [T_i..T_j]) \quad (3.8)$$

$$\tilde{\rho}_H([T_i..T_j]) = \frac{\text{moyenne}(A_{H_2}, [T_i..T_j])}{\text{moyenne}(A_{H_1}, [T_i..T_j])} \quad (3.9)$$

On définit de la même manière, pour les signaux bruts, le RASEH ρ_{xy} ainsi que les deux RASEH moyens basic et modifié :

$$\rho_{xy}(T) = \min\left(\frac{A_x(T)}{A_y(T)}, \frac{A_y(T)}{A_x(T)}\right) \quad (3.10)$$

$$\overline{\rho_{xy}}([T_i..T_j]) = \text{moyenne}(\rho_{xy}(T), [T_i..T_j]) \quad (3.11)$$

$$\tilde{\rho}_{xy}([T_i..T_j]) = \min \left[\frac{\text{moyenne}(A_x, [T_i..T_j])}{\text{moyenne}(A_y, [T_i..T_j])}, \frac{\text{moyenne}(A_y, [T_i..T_j])}{\text{moyenne}(A_x, [T_i..T_j])} \right] \quad (3.12)$$

On a, désormais, des paramètres qui ont une signification physique. En effet, on peut à présent, évaluer le rapport moyen entre les directions horizontales brutes ou principales sur une plage de périodes donnée.

Dans la suite de notre étude, on choisit de diviser le champ des périodes en 8 segments (figure 3.18) regroupant les vibrations de bâtiments similaires [Davidovici 1999]. On découpe les périodes propres comme telles :

- $T < 0.1$: Structures très rigides
- $0.1 \leq T < 0.4$: Réservoirs et voiles.
- $0.4 \leq T < 0.6$: Pylônes.
- $0.6 \leq T < 1$: Réservoirs sphériques et portiques.
- $1 \leq T < 2$: Bâtiments de 10 à 20 étages et halls industriels.
- $2 \leq T < 4$: Cheminées et chateaux d'eau.
- $4 \leq T < 6$: Ponts haubanés et plateformes offshore.
- $T > 6$: Structures très flexibles.

On calcule alors les RASEH moyens basics et modifiés de chaque séismes de la base de donnée pour ces intervalles de périodes. L'annexe III présente en détail toutes les figures relatives aux rapports d'amplitude. On regroupe ensuite les RASEH moyens de chaque séisme selon les critères décrits aux paragraphes 2.4.3 et 2.4.4 en effectuant une nouvelle fois une moyenne. Les tableaux III.1, III.2, III.3 et III.4 regroupent les valeurs des rapports moyens d'amplitude pour les différents couple de (M, R) des séismes historiques et artificiels. Les histogrammes 3.19 et 3.20, résument les variations des rapports $\overline{\rho_{xy}}$, $\tilde{\rho}_{xy}$, $\overline{\rho_H}$ et $\tilde{\rho}_H$ pour les données historiques et synthétiques. On représente sur ces histogrammes

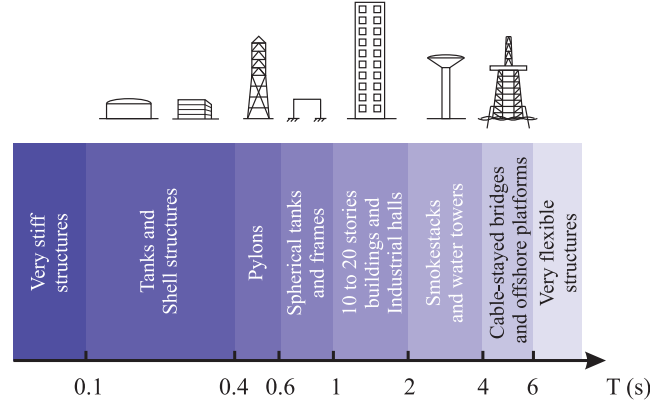


FIG. 3.18 : Discretisation du champ des périodes pour le calcul de moyennes.

les médianes de ces rapports pour l'Est (en bleu) et pour l'Ouest (en rouge). On précise que les histogrammes sont rangés par famille de gauche à droite dans l'ordre énoncé aux chapitres 2.4.3 et 2.4.4.

On remarque tout d'abord que les deux définitions de rapports moyens ($\bar{\rho}$ et $\tilde{\rho}$) sont quasiment équivalentes. On note que les RASEH des données synthétiques sont moins variables que ceux des données historiques. Ils varient entre 0.7 et 1.5 alors que les RASEH historiques varient entre 0.5 et 2.6. Les regroupements de l'Est présentent des rapports d'amplitudes supérieurs à ceux de l'Ouest aussi bien pour les séismes artificiels (1.00 contre 0.89 en valeur médiane sur $\bar{\rho}_H$) qu'historiques (0.95 contre 0.74 en valeur médiane sur $\bar{\rho}_H$). Pour les données historiques cette observation est valable entre les périodes 0.1 s et 4 s alors que pour les données artificielles cette dernière concerne les périodes supérieures à 0.6 s. On note que la décorrélation amplifie cette différence de rapport entre l'Est et l'Ouest. En effet, on note moins d'écart entre l'Est et l'Ouest sur les variables $\bar{\rho}_{xy}$ et $\tilde{\rho}_{xy}$. D'autre part, on remarque que les rapports d'amplitude des données synthétiques sont légèrement au dessus de ceux des données historiques (0.96 contre 0.88 en valeur médiane sur $\bar{\rho}_H$). Cela confirme que nos données synthétiques sont peu corrélées entre elles (rapport proche de 1). Cependant on vient de montrer qu'elles n'étaient pas parfaitement décorrélées, surtout pour l'Ouest.

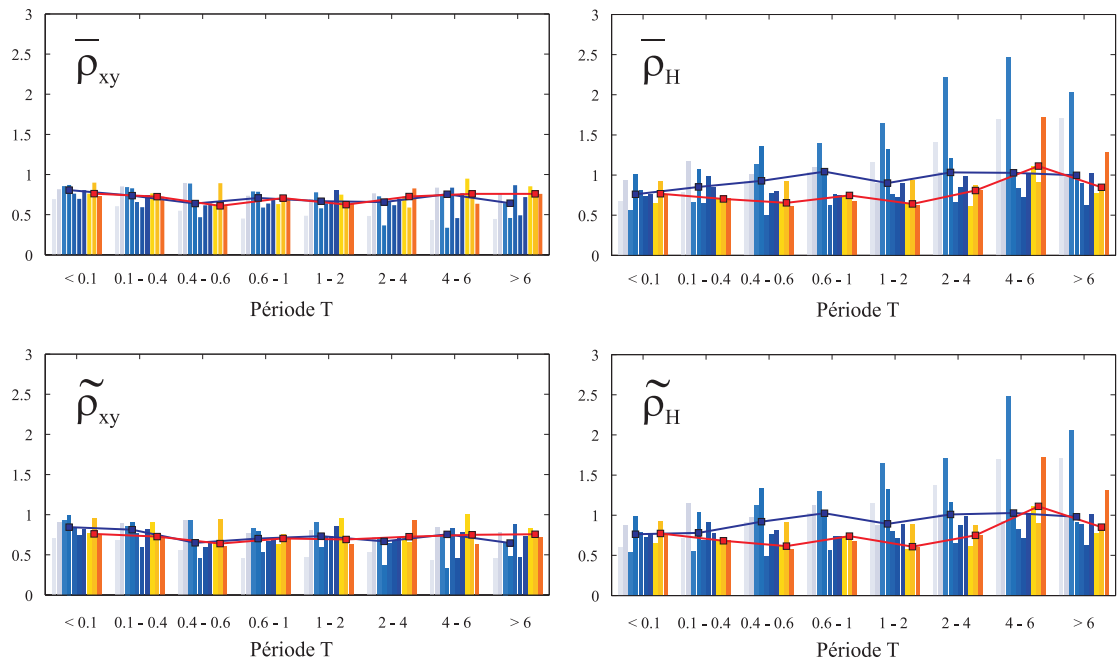


FIG. 3.19 : Rapports moyens d'amplitude spectrale horizontale des données historiques ordonnés selon le couple (M,R) et leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. *Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest*

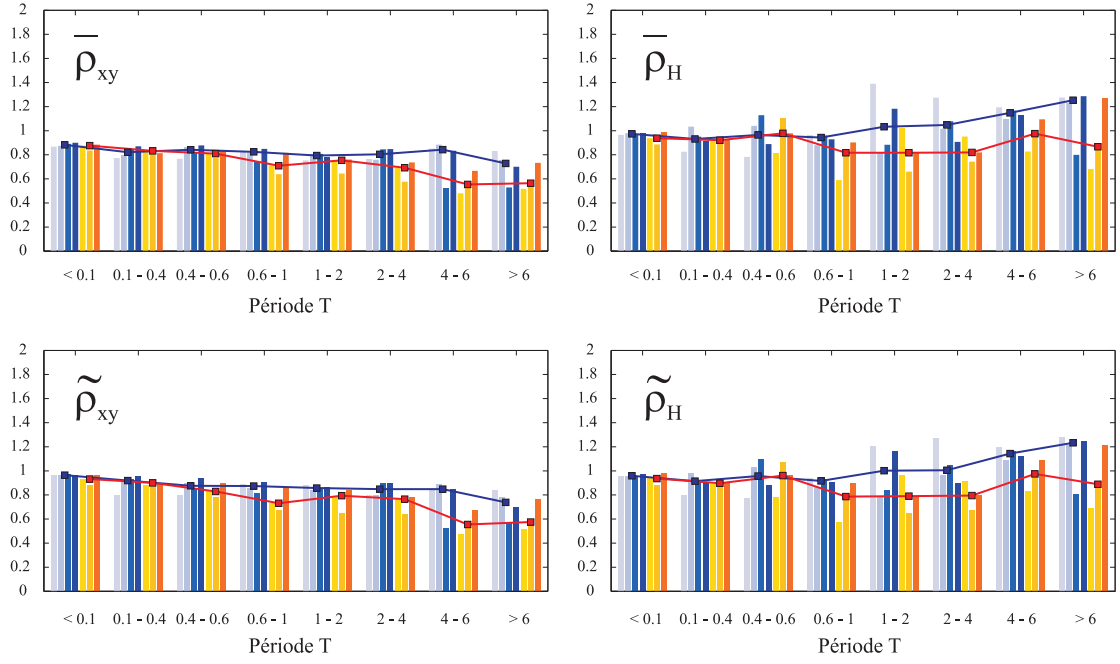


FIG. 3.20 : Rapports moyens d'amplitude spectrale horizontale des données synthétiques ordonnés selon le couple (M,R) et leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. *Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest*

En résumé, on retiendra que les rapports $\overline{\rho_H}$ et $\tilde{\rho}_H$ sont pratiquement équivalents et que les RASEH sont plus faibles et varient plus pour les secousses historiques que celles synthétiques. De plus, on notera que les séismes de l'Est présentent des rapports plus importants qu'à l'Ouest. Enfin on remarquera que les données synthétiques sont peu corrélées du point de vue des spectres mais pas tout à fait décorrélées, surtout pour les séismes de l'Ouest.

3.4.3 Rapports d'amplitude de spectres élastiques verticaux (RASEV)

De la même façon que pour le RASEH, on souhaite développer un rapport d'amplitude de la composante verticale pour les séismes historiques décorrélés. On appelle ce nouveau paramètre rapport d'amplitude vertical (RASEV) et on le note ρ_V :

$$\rho_V(T) = \frac{A_V(T)}{A_{H_1}(T)} \quad (3.13)$$

Où A_V , et A_{H_1} sont respectivement les pseudo-accélérations spectrales dans la direction verticale et dans la direction horizontale majeure. On définit aussi les RASEV moyens basic et modifié sur un intervalle de période $[T_i..T_j]$ par :

$$\overline{\rho_V}([T_i..T_j]) = \text{moyenne}(\rho_V(T), [T_i..T_j]) \quad (3.14)$$

$$\tilde{\rho}_V([T_i..T_j]) = \frac{\text{moyenne}(A_V, [T_i..T_j])}{\text{moyenne}(A_{H_1}, [T_i..T_j])} \quad (3.15)$$

On introduit des RASEV équivalents pour les séismes historiques bruts, notés ρ_z , $\overline{\rho_z}$ et $\tilde{\rho}_z$:

$$\rho_z(T) = \frac{A_z(T)}{\max(A_x(T), A_y(T))} \quad (3.16)$$

$$\overline{\rho_z}([T_i..T_j]) = \text{moyenne}(\rho_z(T), [T_i..T_j]) \quad (3.17)$$

$$\tilde{\rho}_z([T_i..T_j]) = \frac{\text{moyenne}(A_z, [T_i..T_j])}{\max(\text{moyenne}(A_x, [T_i..T_j]), \text{moyenne}(A_y, [T_i..T_j]))} \quad (3.18)$$

Grâce à ces nouveaux indicateurs, on va pouvoir mener une étude caractéristique sur les composantes verticales des séismes historiques de l'Est et de l'Ouest.

On présente en annexe les rapports verticaux en vert sur les figures III.1 et III.2. On regroupe une nouvelle fois les RASEV en fonction du couple (M, R) à l'aide d'une moyenne. Les tableaux III.1 et III.2 en annexe détaillent les valeurs de ces rapports. Pour les données historiques, on illustre les variations de $\bar{\rho}_z$, $\tilde{\rho}_z$, $\bar{\rho}_V$ et $\tilde{\rho}_V$ selon les intervalles de périodes sur la figure 3.21. On présente aussi sur ces histogrammes, les rapports verticaux médians pour l'Est (en bleu) et pour l'Ouest (en rouge).

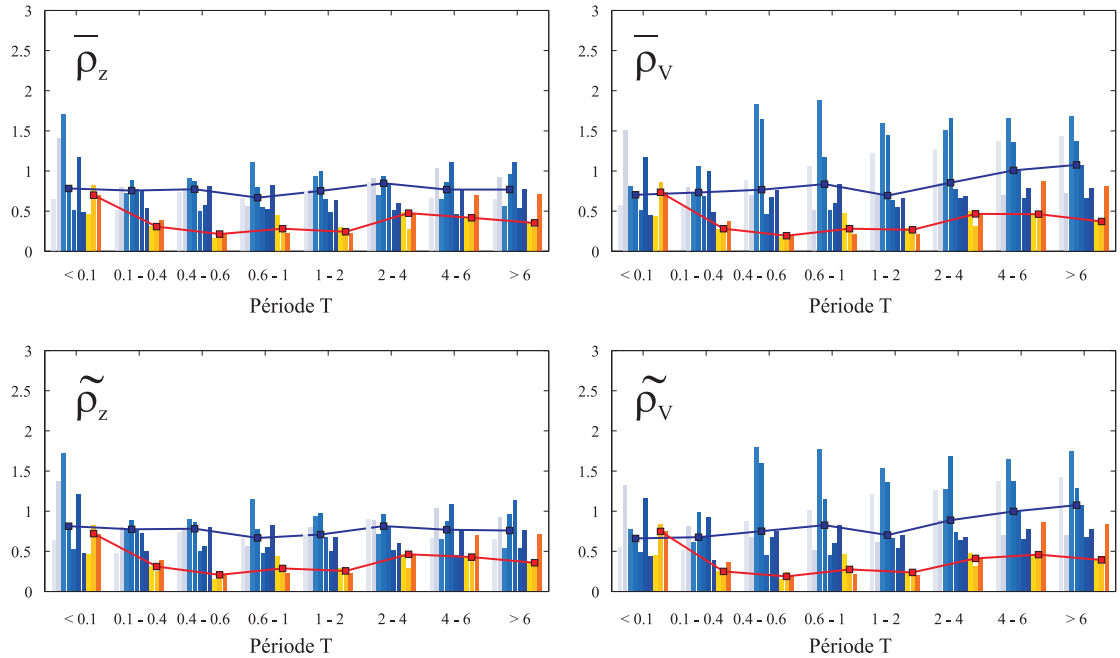


FIG. 3.21 : Rapports moyens d'amplitude spectrale verticale des données historiques ordonnés selon le couple (M,R) et leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. *Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest*

On remarque encore une fois que nos deux paramètres moyens $\bar{\rho}$ et $\tilde{\rho}$ sont quasiment identiques et présentent les mêmes variations. On note une différence flagrante entre l'Est et l'Ouest en ce qui concerne le rapport d'amplitude verticale. La composante verticale est beaucoup plus importante à l'Est qu'à l'Ouest. On calcule une médiane de la variable

$\overline{\rho_V}$ de 0.80 pour l'Est alors qu'elle ne vaut que 0.33 pour l'Ouest. Cette différence est observable pour tous les intervalles de périodes exceptée pour les très petites périodes ($T < 0.1$) où le RASEV est du même ordre de grandeur pour l'Est et l'Ouest (≈ 0.7).

Ce dernier paramètre met en relief une caractéristique importante des séismes du Nord-est Américain. Ces séismes ont une composante verticale non négligeable puisqu'elle représente environ 80% de la composante majeure en amplitude spectrale.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a exposé une étude des spectres élastiques du continent Nord Américain en détail. Il a tout d'abord, présenté un outil de calcul de spectre linéaire automatisé pour une grande base de données utilisant des logiciels de structures du marché.

Il a permis de visualiser et de quantifier l'effet de la décorrélation stochastique des secousses sur les spectres élastiques. Ce changement d'axes cause une inversion entre les directions x , y et H_1, H_2 dans 50% des cas, démontrant qu'il n'y a pas de direction majeure privilégiée. Il a tendance à séparer les spectres horizontaux entre eux, augmentant le spectre majeur et diminuant le spectre mineur. Il réduit de plus le spectre vertical.

Il a ensuite illustré les spectres moyens des séismes présentant les mêmes magnitudes et distances épicentrales (M, R). Les spectres élastiques de l'Est présentent un contenu fréquentiel bien plus élevé que ceux de l'Ouest. Les valeurs spectrales significatives pour l'Est sont concentrées entre 0.01 s et 1 s alors qu'à l'Ouest ces valeurs se retrouvent entre 0.1 s et 6 s. Le spectre vertical de l'Est est en général plus élevé qu'à l'Ouest, excepté pour les très petites périodes où ils sont sensiblement du même ordre.

Enfin, ce chapitre a calculé et présenté les rapports d'amplitude des spectres élastiques horizontaux (RASEH) et verticaux (RASEV). Les séismes historiques donnent des RASEH plus faibles et plus variables que les secousses synthétiques (0.88 contre 0.96). Ceci prouve que les données synthétiques sont moins corrélées entre elles d'un point de vue spectral que les enregistrements historiques, mais ne sont pas tout à fait décorréliées. Les

données de l'Est présentent des RASEH légèrement plus élevé qu'à l'Ouest (0.95 contre 0.74 pour les données historiques et 1.00 contre 0.89 pour les données synthétiques). De plus, les RASEV de l'Est sont nettement plus grand que ceux de l'Ouest (0.80 contre 0.33).

On caractérise bien les spectres élastiques du continent Nord Américain dans cette partie.

On va conduire par la suite, une étude du même ordre sur les spectres non-linéaires.

CHAPITRE 4

SPECTRES INÉLASTIQUES ET DEMANDES EN DUCTILITÉ

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on étudie les spectres sismiques inélastiques à ductilité constante et les demandes en ductilité. On commence d'abord par détailler le module non-linéaire de l'outil de calcul automatique RSPECTRUM. On présente en particulier un algorithme efficace permettant de converger rapidement vers une ductilité choisie. On illustrera ensuite l'influence de la décorrélation sur les spectres non-linéaires. On terminera ce chapitre par une étude approfondie des spectres non-linéaires, où l'on caractérisera les rapports d'amplitude de spectre horizontal et vertical en fonction de la ductilité.

4.2 Développement d'un module de calcul non-linéaire pour RSPECTRUM

L'objectif de construire une base de données de spectres de réponse ne se limite pas au domaine linéaire. On souhaite calculer les spectres non-linéaires des séismes historiques et artificiels de notre base de données. Par conséquent, il a fallu développer un module non-linéaire pour notre outil automatique RSPECTRUM. Ce module intitulé *RNonLin* est présenté dans ce paragraphe.

4.2.1 Principe général

L'utilisation de RSPECTRUM avec le module *RNonLin* ne change pas le principe de base de l'utilitaire de calcul automatique. On utilise toujours des programmes de structure pour calculer les réponses temporelles en déplacement, vitesse et accélération et l'on construit le spectre inélastique correspondant. La différence pour le calcul non-linéaire, c'est qu'il y a une étape itérative pour converger vers un système élasto-plastique ayant une ductilité donnée. Les étapes d'utilisation se résument en :

1. Paramétrage du spectre (ξ , T_{min} , T_{max} et ΔT)
2. Recherche du système élasto-plastique correspondant à la ductilité fixée μ .
3. Calcul de la réponse structurale de ce système élasto-plastique
4. Collecte des résultats et construction des spectres inélastiques de réponse ($A^{(\mu)}$, $V^{(\mu)}$ et $D^{(\mu)}$)

Le module *RNonLin* consiste à programmer une recherche rapide du système élasto-plastique donnant la ductilité cible μ . Ce module permet de traiter jusqu'à 5 ductilités cibles simultanément. Les ductilités utilisées dans cette étude seront $\mu = [1.5, 2, 4, 6, 8]$. On va désormais détailler l'algorithme de convergence de *RNonLin*.

4.2.2 Détail de l'algorithme

On présente dans ce paragraphe l'algorithme de convergence vers une ductilité fixée μ pour le calcul de spectre non-linéaire. Cette étape de la construction du spectre correspond au point 6 (a) du processus décrit section 2.6.2 ou au point 2 des étapes d'utilisation de RSPECTRUM avec le module *RNonLin* énuméré à la section 4.2.1. Le principe de cette itération est de trouver la force de plastification relative \bar{f}_y correspondante à un système de ductilité μ . Après avoir observé une certaine corrélation affine entre les variables $\log(\mu)$ et $-\log(\bar{f}_y)$, il est apparu intéressant de travailler sur cet espace de convergence. Le principe de l'algorithme consiste à balayer une première fois grossièrement la variable $-\log(\bar{f}_y)$ pour construire une courbe par segment $\log(\mu) = F(-\log(\bar{f}_y))$. Grâce à cette courbe, on initialise les variables recherchées et l'on procède à un algorithme de convergence utilisant la méthode des droites sécantes.

On va détailler la convergence de l'algorithme pour la secousse de Miramichi (MIR1) d'azimut 18° à une période de $T = 0.5s$, pour un amortissement de $\xi = 5\%$ et une ductilité de $\mu = 1.5$. Le logiciel de dynamique des structures utilisé dans cet exemple est OPENSEES [McKenna 2000].

1. Le programme calcule tout d'abord la réponse élastique de la structure. Il enregistre

le déplacement, la vitesse et l'accélération maxima. On trouve ici :

$$u_{max} = 0.216 \text{ mm}, \quad v_{max} = 0.0135 \text{ m/s} \quad \text{et} \quad a_{max} = 0.183 \%g \quad (4.1)$$

2. Ensuite, il calcule la réponse élasto-plastique de 10 systèmes ayant des forces de plastification relatives différentes. Ceci constitue un balayage grossier de la variable $-\log(\bar{f}_y)$. On répartie les valeurs de \bar{f}_y de façon à ce que :

$$-\log(\bar{f}_y) = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1] \quad (4.2)$$

On obtient une courbe approximative illustrant l'évolution de la ductilité en fonction de la force de plastification relative (figure 4.1(a)). Dans notre exemple, nous trouvons :

$$F([-\log(\bar{f}_y)]) = [\log(\mu)] \quad (4.3)$$

$$F\left(\begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1.0 \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} 0.1109 \\ 0.1428 \\ 0.4237 \\ 0.6514 \\ 0.7960 \\ 0.9670 \\ 1.0696 \\ 1.2091 \\ 1.3376 \\ 1.4738 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

On déduit les valeurs initiales des \bar{f}_y par interpolation linéaire. On trouve pour $\mu = 1.5$ ($\log(\mu) = 0.1761$) :

$$\bar{f}_y(initial) = 0.6140 \quad (4.5)$$

Cette valeur se trouve sur l'intervalle $[0.2, 0.3]$ de $-\log(\bar{f}_y)$

3. Puisque l'on connaît désormais des bornes encadrant la solution, on peut utiliser la méthode des droites sécantes pour converger rapidement. On calcule la valeur de la ductilité pour la force de plastification relative initiale grâce à un programme de structure (OPENSEES par exemple). On trouve $F(-\log(\bar{f}_y(initial))) = 0.1507$, ce qui constitue une nouvelle borne inférieure. Notre intervalle se réduit et l'on réitère ce procédé jusqu'à ce que la différence entre la ductilité calculée et celle voulue n'excède plus la tolérance Tol ou que l'espace entre deux solutions successives soient inférieur à $TolCv$ (figure 4.1(b)). On trouve dans notre exemple au bout de 4 itérations :

$$\bar{f}_y = 0.5997 \quad \text{et} \quad \mu_{calcul} = \tilde{\mu} = 1.49910172075 \quad (4.6)$$

4. Ce dernier système élasto-plastique permet enfin de construire les spectres non-linéaires pour la ductilité 1.5. Dans notre cas, on trouve les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} A^{(1.5)}(0.5) &= 0.002085 \%g \\ V^{(1.5)}(0.5) &= 0.013098 \, m/s \\ D^{(1.5)}(0.5) &= 0.194145 \, mm \end{aligned} \quad (4.7)$$

L'algorithme et le module complet a répondu à nos attentes en terme de précision et de vitesse de calcul. Le choix final de l'utilisation du langage TCL&TK et du programme de OPENSEES permet d'optimiser les performances de notre outils de calcul RSPECTRUM. Avant la construction de la base de données, il a fallu valider les résultats de RSPECTRUM avec le module *RNonLin* à l'aide de logiciels de calcul de spectre commerciaux.

4.2.3 Validation de l'outils de calcul

L'application RSPECTRUM avec le module *RNonLin* doit être vérifiée avant la construction de notre base de données spectrale non-linéaire. On compare dans un premier temps les déplacements trouvés par les logiciels de structure lancés à partir de RSPECTRUM en

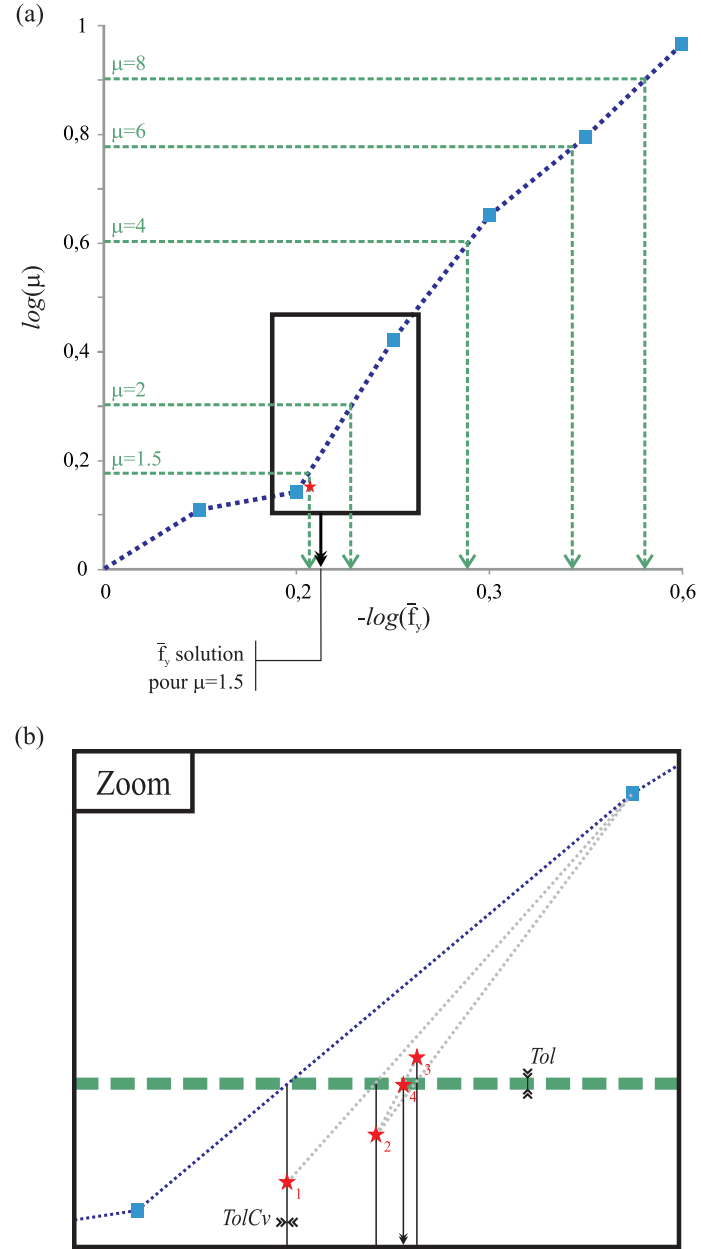


FIG. 4.1 : (a) Illustration du balayage préliminaire de $\log(\mu) = F(-\log(\bar{f}_y))$, (b) Détail de l'algorithme de convergence par segment.

régime *inélastique* et le logiciel de structure témoin ADINA [ADINA 2006]. La figure 4.2 illustre cette vérification pour les logiciels RUAUMOKO et OPENSEES. On remarque, là encore, que nos deux logiciels sont bien calibrés pour des calculs en régime non-linéaire.

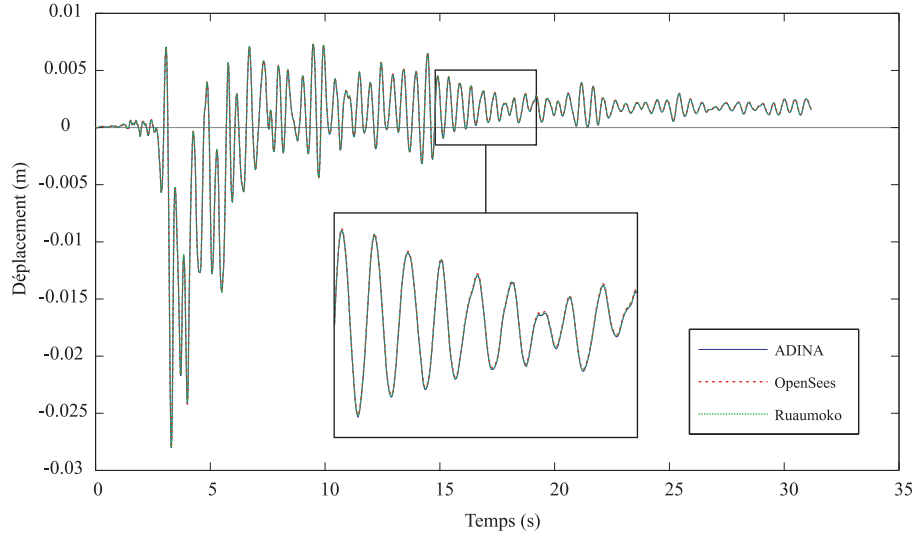


FIG. 4.2 : Comparaison avec ADINA des déplacements inélastiques calculés par RUAUMOKO et OPENSEES via RSPECTRUM avec le module *RNonLin*.

Il reste désormais à valider la convergence de notre algorithme. Les logiciels de calcul de spectre non-linéaire SEISMOSIGNAL et BISPEC ont été choisis comme témoins. La figure 4.3 compare les spectres de l'Imperial Valley (IMP dans le tableau I.2), obtenus par nos témoins et par RSPECTRUM avec le module *RNonLin* utilisant le programme OPENSEES. On remarque que nos résultats sont très similaires à ceux de BISPEC, mais sont inférieurs à ceux de SEISMOSIGNAL. Cette différence montre que SEISMOSIGNAL utilise un algorithme de convergence vers la ductilité fixée bien différent de RSPECTRUM et *Bispec*. On étudie dans nos analyses des pseudo-spectres comme le préconise le CNB 2005. Ainsi, on valide grâce à *Bispec* notre outil de calcul et par la même occasion notre algorithme de convergence.

Nous avons deux exigences pour notre outil de calcul :

- la fiabilité : nous venons de valider ce point en comparant nos résultats à des logiciels

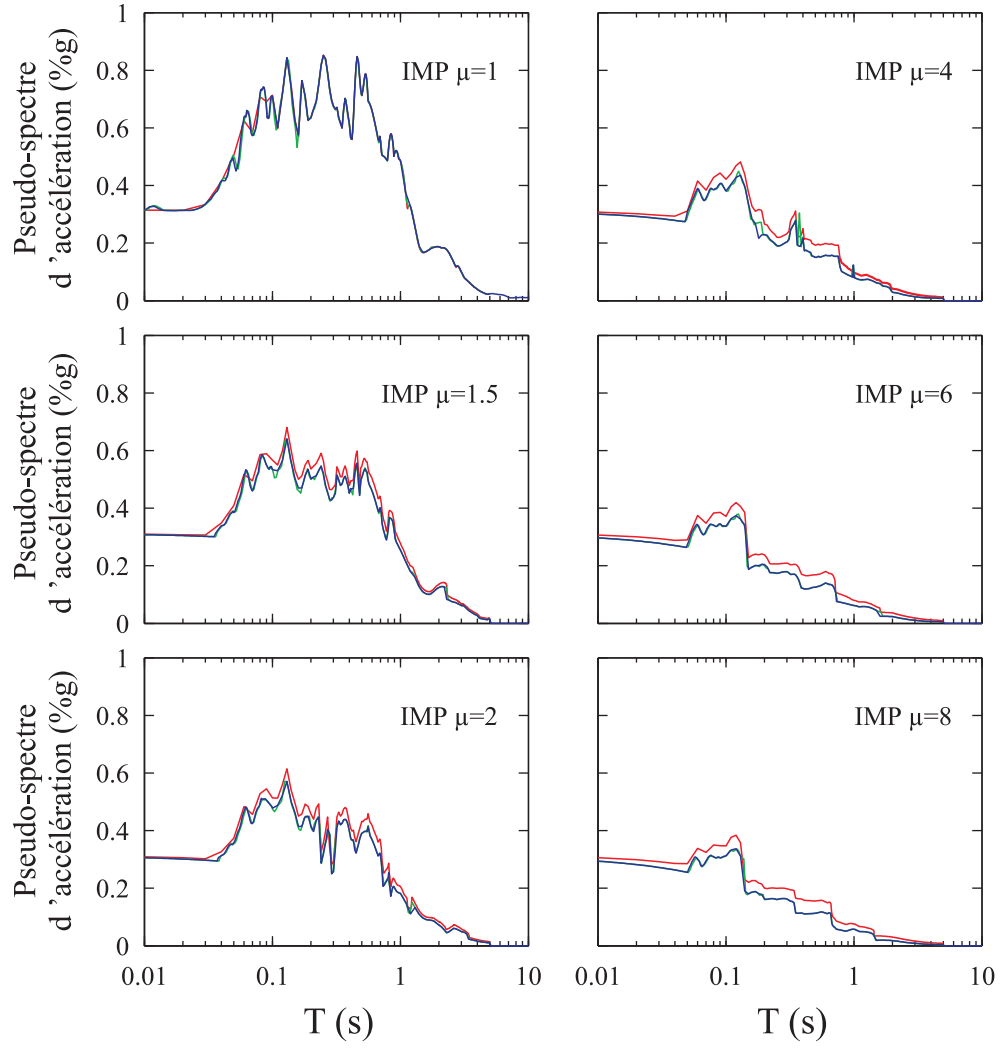


FIG. 4.3 : Comparaison des pseudo-spectres inélastiques calculés par RSPECTRUM avec des logiciels témoins : *Légende : bleu = RSPECTRUM ; rouge = SEISMOSIGNAL et vert = BISPEC.*

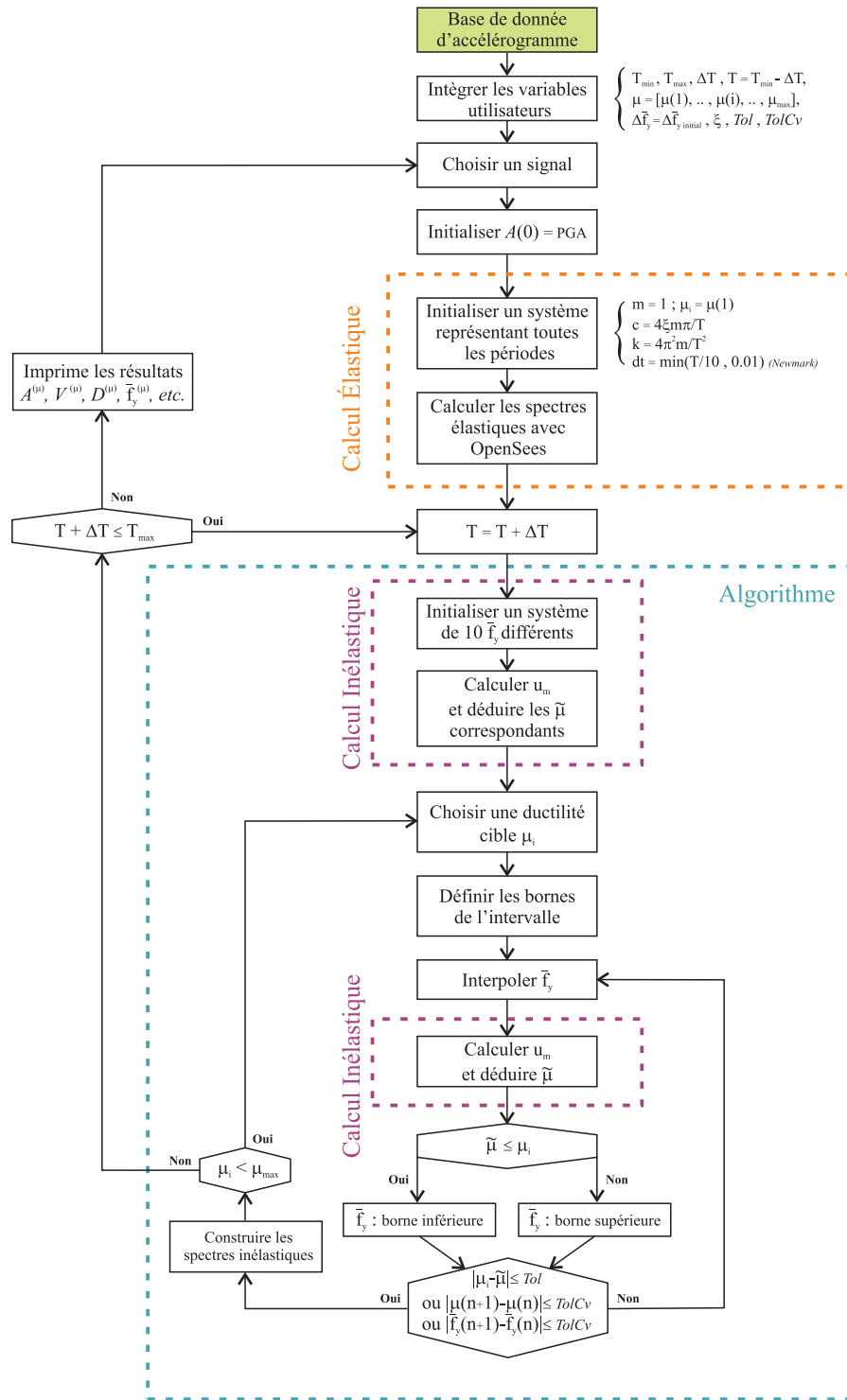


FIG. 4.4 : Diagramme de fonctionnement du programme RSPECTRUM.

témoins

- la rapidité : Notre application a pour vocation de calculer automatiquement des pseudo-spectres pour une base de données. Il faut s’assurer que ces calculs seront réalisés dans un temps convenable.

Pour des raisons de rapidité et d’efficacité, le logiciel OPENSEES et l’utilitaire TCL&TK ont été retenus pour le développement final du projet. Plusieurs paramètres de l’algorithme ont été corrigés pour optimiser le temps de calcul. Le nombre de point de calcul de \bar{f}_y lors du balayage grossier a été calibré pour optimiser la vitesse. On trouve finalement que 10 points de calcul distribués comme dans l’exemple du paragraphe 4.2.2 suffisent. La figure 4.4 résume en totalité le fonctionnement de notre outils de calcul.

4.3 Étude approfondie des spectres inélastiques

De la même façon que précédemment, on va présenter notre base complète de spectres et les spectres inélastiques moyens des couples (M, R) pour chaque ductilité. On étudiera ensuite les rapports d’amplitude des spectres inélastiques horizontaux et verticaux en fonction de la ductilité.

4.3.1 Présentation de la base de données spectrales et des spectres inélastiques moyens

Ce n’est pas moins de 2124 pseudo-spectres d’accélération (*resp. de vitesse, de déplacement*) que RSPECTRUM avec le module *RNonLin* a pu construire. On compte 354 spectres par ductilité, 129 calculés à partir d’accélérogrammes bruts et 225 à partir de données décorrélés. Cette base de données est partiellement consultable en annexe de ce mémoire. Un projet de présentation numérique consultable sur le net devrait être réalisé par un étudiant stagiaire dans les mois qui suivent. On étudie dans ce mémoire les spectres inélastiques à ductilité constante. On choisit la gamme de ductilité suivante : $\mu = 1.5, 2, 4, 6$ et 8 . On adoptera les mêmes notations que pour les variables élastiques en ajoutant un indice entre parenthèses indiquant la ductilité fixée. Ainsi le pseudo-spectre d’accélération pour

la ductilité μ s'écrira $A^{(\mu)}$. On différenciera les variables élastiques grâce à l'indice ⁽¹⁾.

Maintenant que les notations sont explicitées, on peut calculer les spectres inélastiques moyens d'une famille (M, R). La méthode utilisée est identique à celle du paragraphe 3.4.1. On normalise les spectres inélastiques par la méthode du pic d'accélération. On obtient :

$$\overline{A}_{ij}^{(\mu)}(T) = \frac{A_{ij}^{(\mu)}(T)}{A_{H1j}^{(\mu)}(0)} ; \quad i = H_1, H_2 \text{ ou } V \quad \text{pour les séismes décorrelés} \quad (4.8)$$

$$\overline{A}_{ij}^{(\mu)}(T) = \frac{A_{ij}^{(\mu)}(T)}{\max(A_{xj}^{(\mu)}(0), A_{yj}^{(\mu)}(0))} ; \quad i = x, y \text{ ou } z \quad \text{pour les séismes bruts} \quad (4.9)$$

où $A_{H1j}^{(\mu)}(0)$ représente le PGA du séisme j et T la période. On procède alors à une moyenne sur l'ensemble de N séismes d'un même groupement m pour définir le spectre inélastique moyen $\overline{A}_{im}^{(\mu)}$:

$$\overline{A}_{im}^{(\mu)}(T) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \overline{A}_{ij}^{(\mu)}(T) ; \quad i = H_1, H_2, V, x, y \text{ ou } z \quad (4.10)$$

Les figures 4.5, 4.6, 4.7 et 4.8 illustrent les spectres moyens inélastiques des séismes historiques bruts et décorrelés de l'Est et de l'Ouest.

On remarque tout d'abord que la décorrélation a toujours les mêmes effets sur les spectres. Elle sépare les spectres horizontaux et réduit le spectre vertical. La ductilité a une influence sur l'amplitude mais pas sur la fréquence. Plus la ductilité est grande plus les spectres sont faibles et les pics réduits. On vérifie bien que la ductilité permet de réduire les efforts de cisaillement à la base d'une structure. Les spectres normalisés inélastiques de l'Est et de l'Ouest présentent des amplitudes similaires pour une ductilité fixée par contre on note toujours des différences sur le contenu fréquentiel. Les spectres inélastiques moyens de l'Ouest s'étalent sur une plus grande gamme de périodes que ceux de l'Est. Dans le domaine inélastique, les composantes verticales des spectres sont aussi, en général, plus élevées à l'Est qu'à l'Ouest. Ce phénomène se traduira par des rapports verticaux

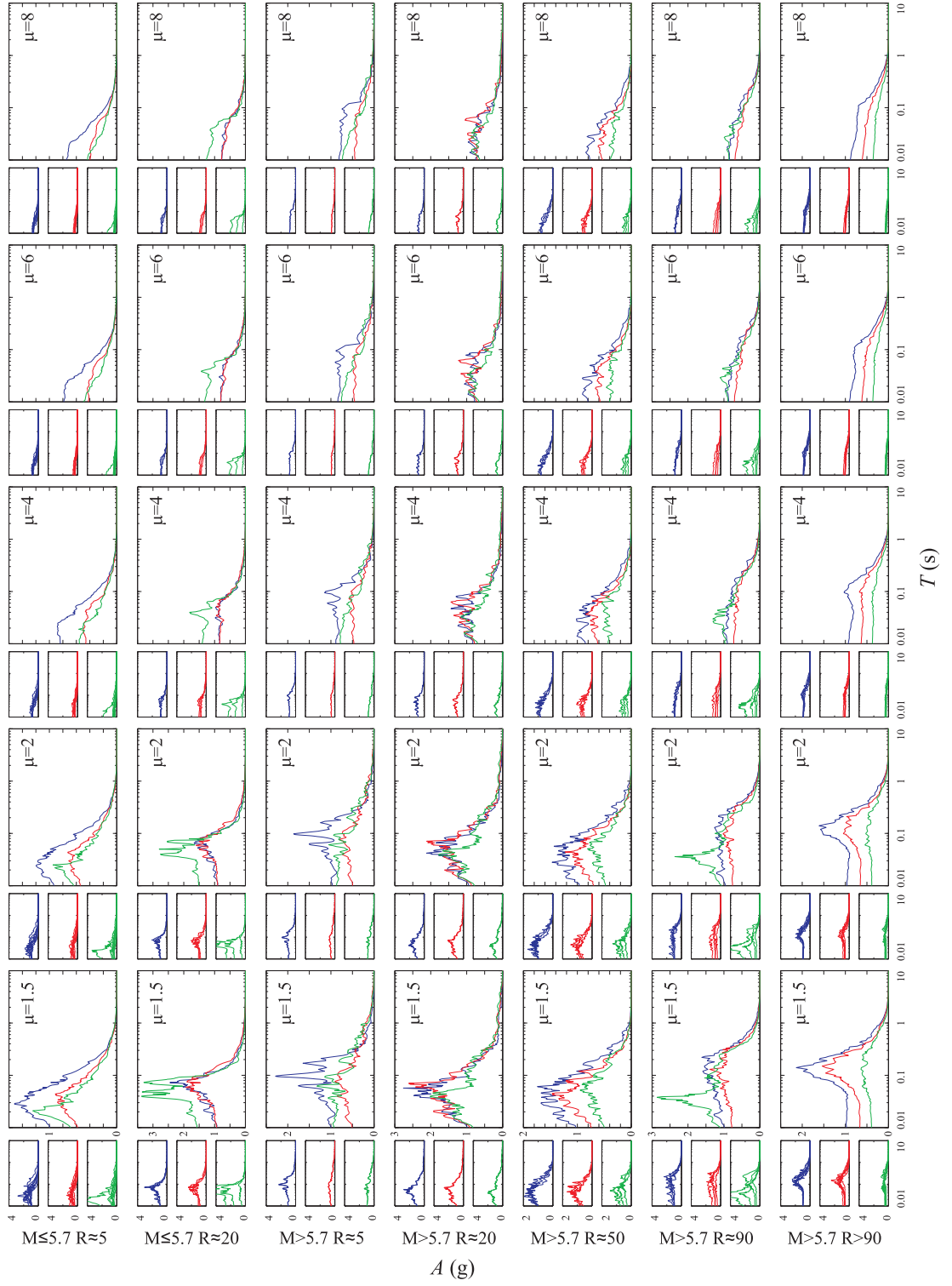


FIG. 4.5 : Spectres moyens inélastiques des séismes historiques de l'Est décorrélés.

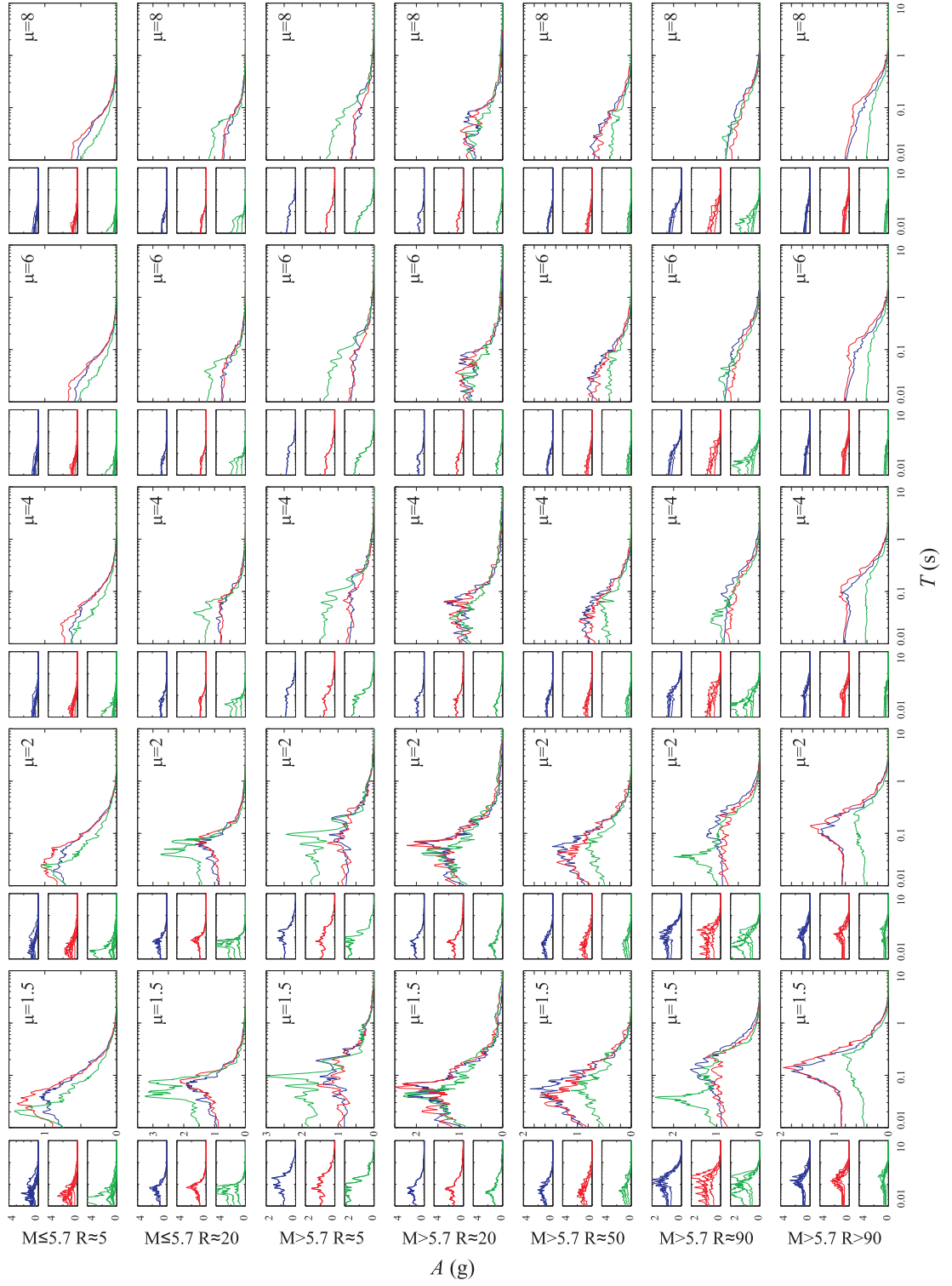


FIG. 4.6 : Spectres moyens inélastiques des séismes historiques de l'Est bruts.

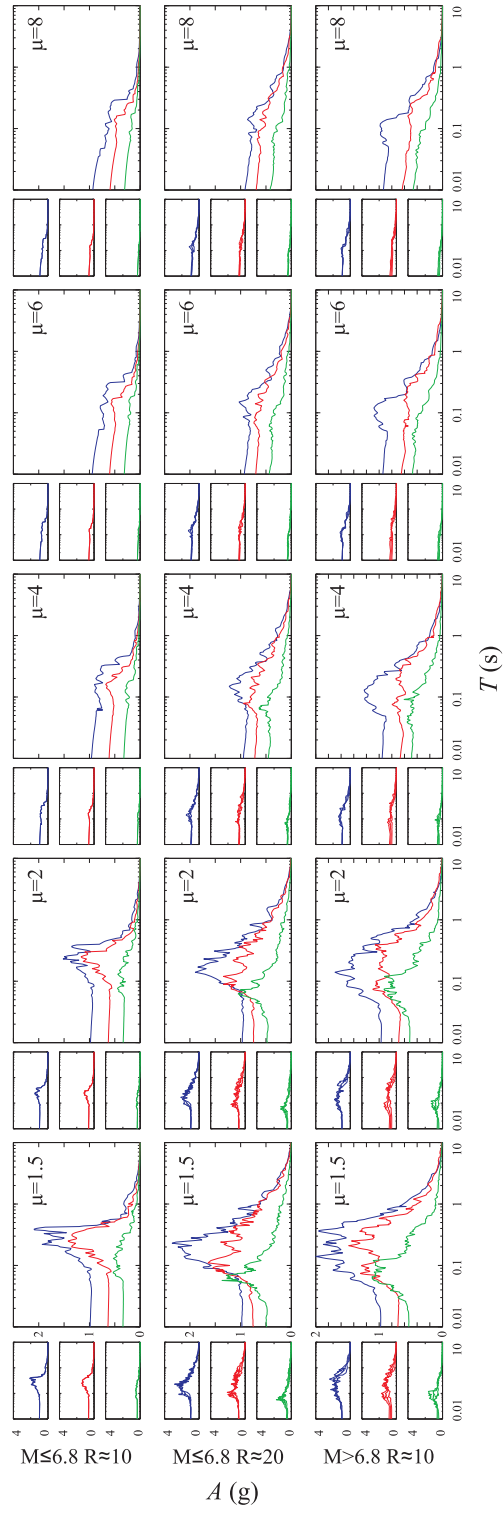


FIG. 4.7 : Spectres moyens inélastiques des séismes historiques de l'Ouest décorrélés.

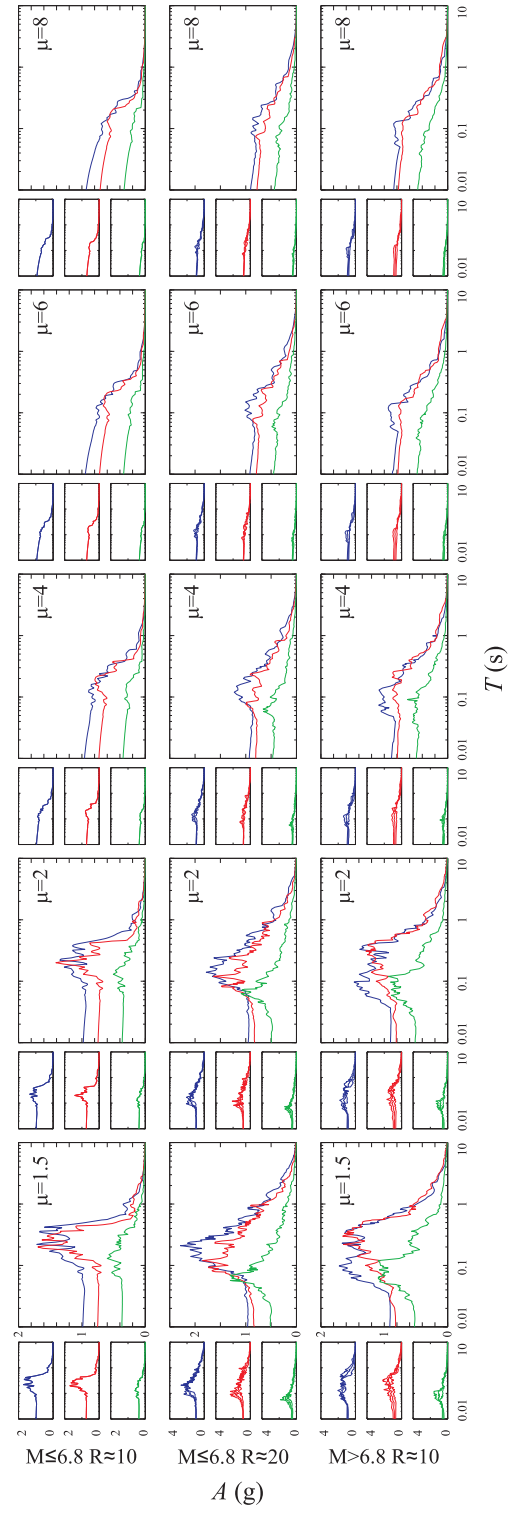


FIG. 4.8 : Spectres moyens inélastiques des séismes historiques de l'Ouest bruts.

d'amplitude inélastique à l'Ouest plus faible qu'à l'Est (voir section 4.3.3).

On observe des comportements similaires pour les spectres inélastiques moyens synthétiques. On présente les spectres inélastiques moyens des séismes artificiels décorrélés et bruts de l'Est et de l'Ouest sur les figures 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12.

On ne peut toujours pas déduire de caractéristiques sur le spectre moyen inélastique en fonction de la distance épacentrale ou de la magnitude. Les tendances observées sont faibles et non significatives vu la taille de notre échantillon. Par la suite, on va étudier les rapports d'amplitude des spectres inélastiques entre les directions horizontales puis entre la direction verticale et la direction majeure horizontale.

4.3.2 Rapports d'amplitude de spectres inélastiques horizontaux (RASIH)

On s'intéresse à présent au rapport d'amplitude des spectres inélastiques horizontaux (RASIH). Comme pour les spectres élastiques, on appelle respectivement $\rho_H^{(\mu)}(T)$ et $\rho_{xy}^{(\mu)}(T)$ les RASIH pour la ductilité μ des secousses décorrélées et brutes. Ces paramètres sont définis par :

$$\rho_H^{(\mu)}(T) = \frac{A_{H_2}^{(\mu)}(T)}{A_{H_1}^{(\mu)}(T)} \quad (4.11)$$

$$\rho_{xy}^{(\mu)}(T) = \min\left(\frac{A_x^{(\mu)}(T)}{A_y^{(\mu)}(T)}, \frac{A_y^{(\mu)}(T)}{A_x^{(\mu)}(T)}\right) \quad (4.12)$$

Où $A_\ell^{(\mu)}$ est la pseudo-accélération spectrale inélastique dans la direction ℓ . On procède, là encore, à deux types de moyenne, basique et modifiée, sur un intervalle de périodes $[T_i..T_j]$ que l'on notera $\bar{\rho}_\ell^{(\mu)}([T_i..T_j])$ et $\tilde{\rho}_\ell^{(\mu)}([T_i..T_j])$ avec $\ell = H$ ou xy , définies par :

$$\bar{\rho}_H^{(\mu)}([T_i..T_j]) = \text{moyenne}(\rho_H^{(\mu)}(T), [T_i..T_j]) \quad (4.13)$$

$$\tilde{\rho}_H^{(\mu)}([T_i..T_j]) = \frac{\text{moyenne}(A_{H_2}^{(\mu)}, [T_i..T_j])}{\text{moyenne}(A_{H_1}^{(\mu)}, [T_i..T_j])} \quad (4.14)$$

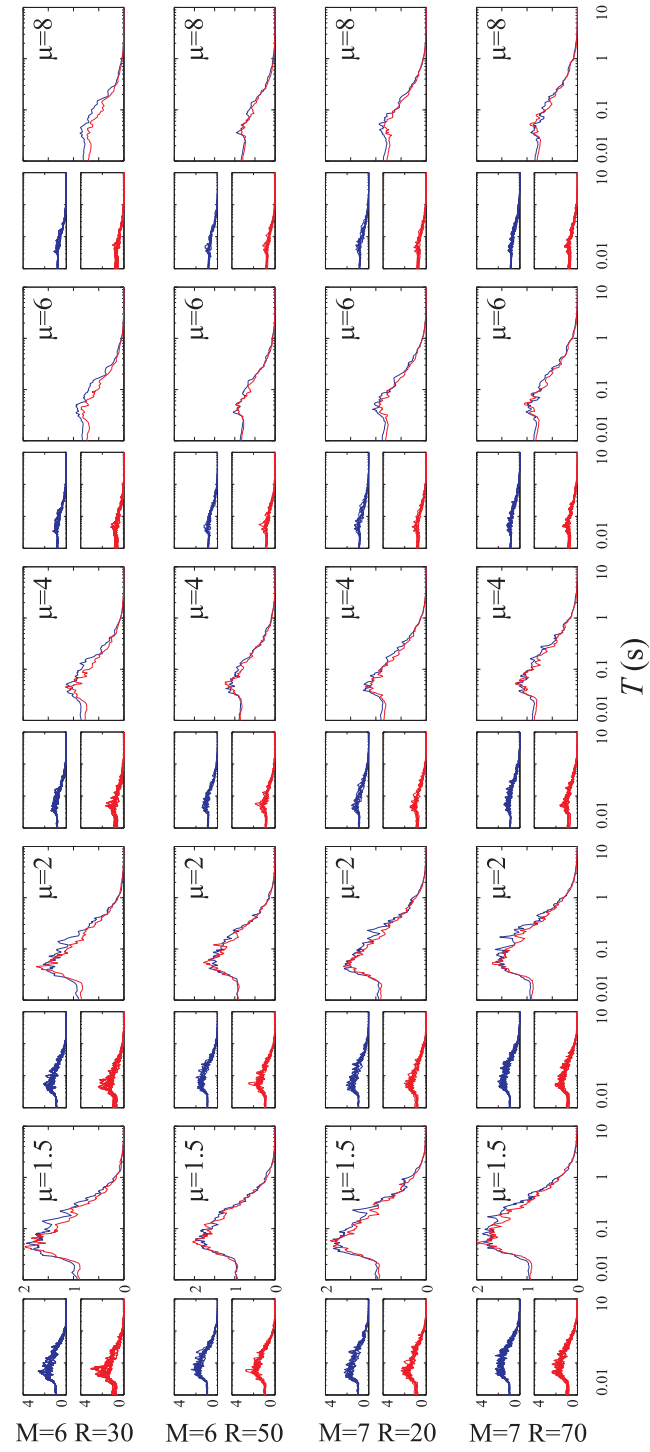


FIG. 4.9 : Spectres moyens inélastiques des séismes synthétiques de l'Est décorrélés.

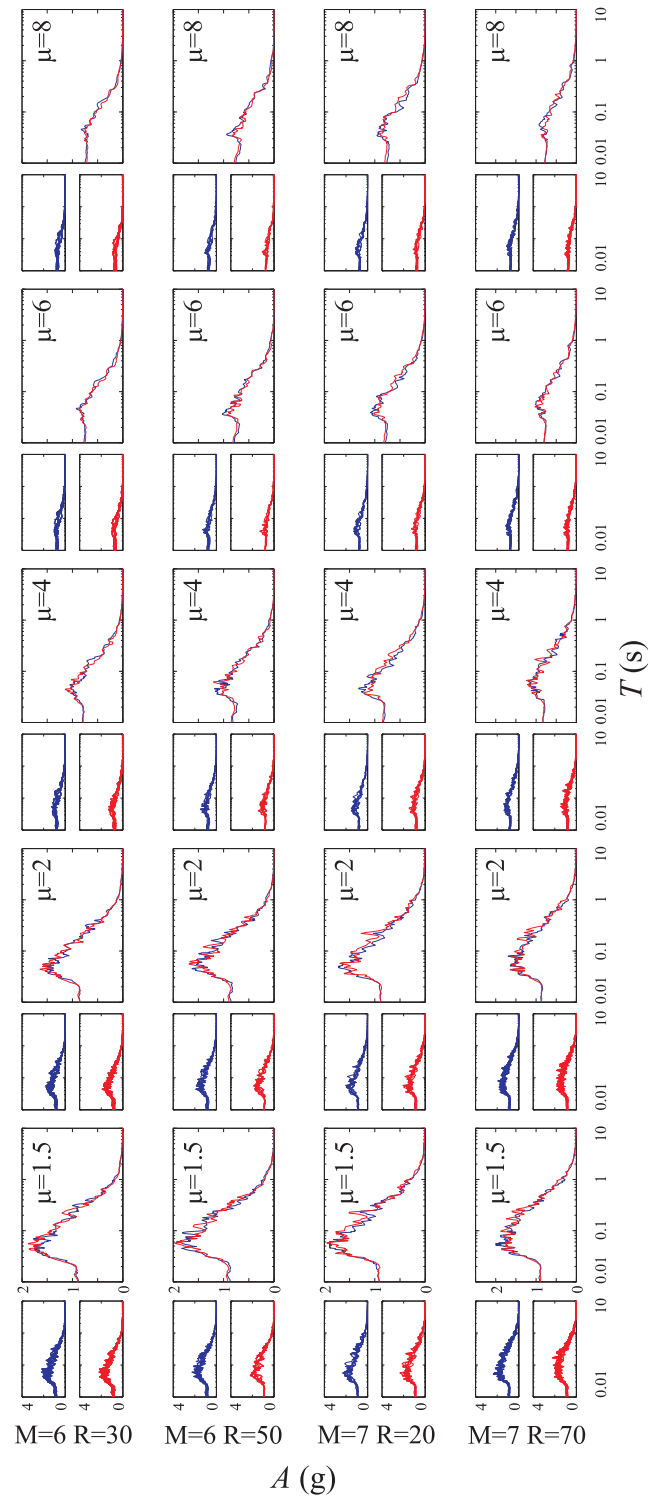


FIG. 4.10 : Spectres moyens inélastiques des séismes synthétiques de l'Est bruts.

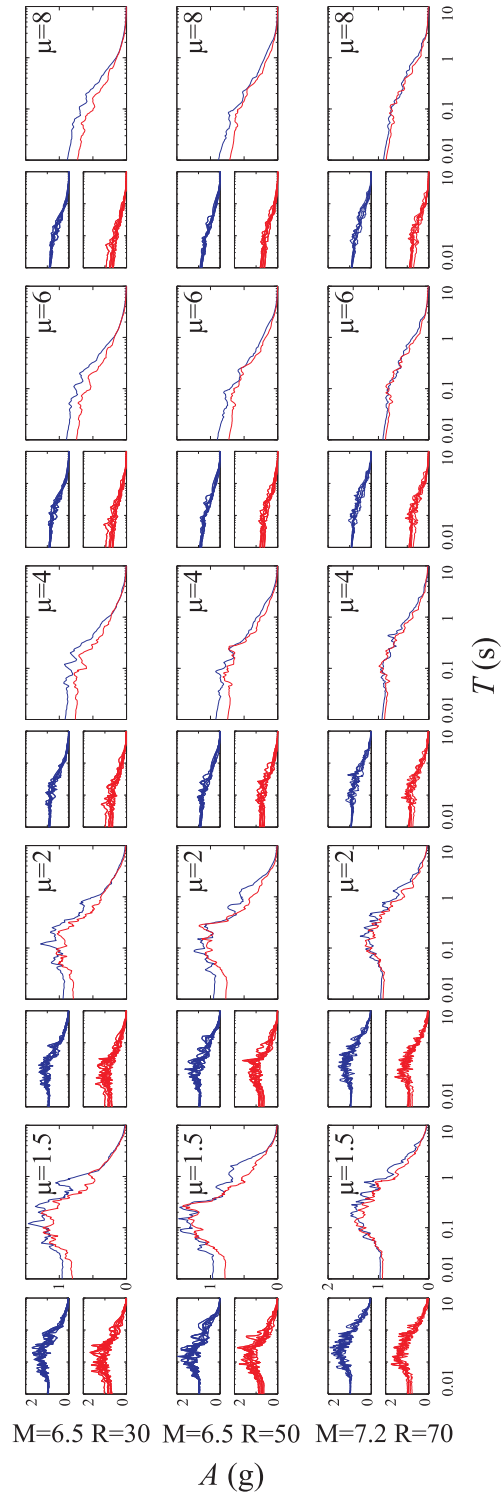


FIG. 4.11 : Spectres moyens inélastiques des séismes synthétiques de l'Ouest décorrélés.

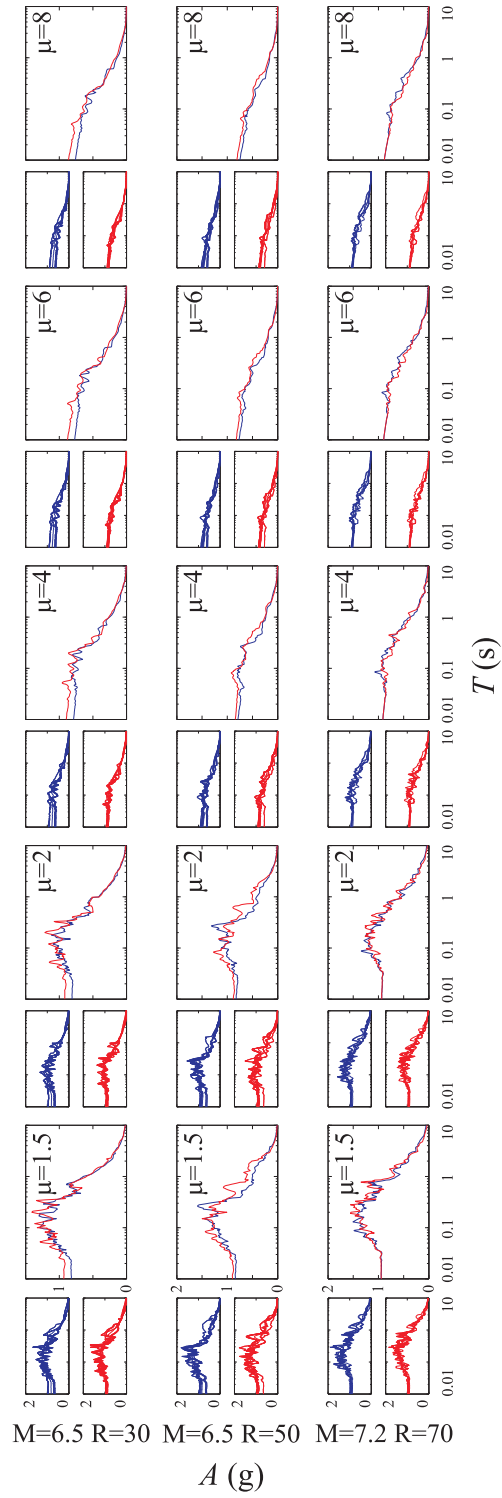


FIG. 4.12 : Spectres moyens inélastiques des séismes synthétiques de l'Ouest bruts.

pour les séismes décorrélés, et par :

$$\bar{\rho}_{xy}^{(\mu)}([T_i..T_j]) = \text{moyenne}(\rho_{xy}(T), [T_i..T_j]) \quad (4.15)$$

$$\tilde{\rho}_{xy}^{(\mu)}([T_i..T_j]) = \min \left[\frac{\text{moyenne}(A_x^{(\mu)}, [T_i..T_j])}{\text{moyenne}(A_y^{(\mu)}, [T_i..T_j])}, \frac{\text{moyenne}(A_y^{(\mu)}, [T_i..T_j])}{\text{moyenne}(A_x^{(\mu)}, [T_i..T_j])} \right] \quad (4.16)$$

pour les séismes bruts. Ce sont ces derniers paramètres qui vont être étudiés pour les spectres non-linéaires sur les intervalles de périodes définis au paragraphe 3.4.2. L'annexe IV présente en détail les RASI basiques des séismes groupés par couple (M, R). Pour ce calcul, on moyenne la variable $\rho_\ell^{(\mu)}(T)$, où $\ell = H$ ou xy , pour tous les N séismes du même groupement m . On obtient :

$$\underline{\rho}_{\ell m}^{(\mu)}(T) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \rho_\ell^{(\mu)}(T) ; \quad \ell = H \text{ ou } xy \quad (4.17)$$

On procède de la même façon que pour $\rho_\ell^{(\mu)}(T)$ pour calculer $\underline{\bar{\rho}}_{\ell m}^{(\mu)}([T_i..T_j])$ et $\underline{\tilde{\rho}}_{\ell m}^{(\mu)}([T_i..T_j])$. Les histogrammes 4.14, 4.15, 4.16 et 4.17 résument les variations des rapports $\bar{\rho}_{xy}^{(\mu)}$, $\tilde{\rho}_{xy}^{(\mu)}$, $\bar{\rho}_H^{(\mu)}$ et $\tilde{\rho}_H^{(\mu)}$ pour chaque groupement (M, R) en fonction du domaine de périodes ou de la ductilité pour les données historiques et synthétiques. On représente sur ces histogrammes les médianes de ces rapports pour l'Est (en bleu) et pour l'Ouest (en rouge). On rappelle que les histogrammes sont rangés par famille de gauche à droite dans l'ordre énoncé aux chapitres 2.4.3 et 2.4.4.

On remarque premièrement que les résultats compilés dans ce chapitre pour une ductilité de 1 sont similaires à ceux calculés au chapitre 3.4.2. En effet, la moyenne regroupant les secousses par groupe (M, R) a été effectuée avant le calcul des rapports moyens, ce qui diffère de la méthode des rapports élastiques. On note alors qu'il n'y a pas d'effets significatifs sur l'ordre des moyennes. On remarque ensuite que les deux définitions de rapports moyens ($\bar{\rho}^{(\mu)}$ et $\tilde{\rho}^{(\mu)}$) présentent les mêmes caractéristiques. On notera tout de même que les rapports modifiés donnent des valeurs plus faibles que les rapports basiques et qu'ils réduisent l'écart entre l'Est et l'Ouest pour les données historiques (5,54% et 5,01% plus faible pour les données synthétiques de l'Est et de l'Ouest respectivement et 15,9% et

2,82% plus faible pour les données historiques de l'Est et de l'Ouest respectivement). On montre toujours que les rapports horizontaux de l'Est sont plus élevés que ceux de l'Ouest pour chaque ductilité. La variation des rapports en fonction de la ductilité est présentée de façon simplifiée sur la figure 4.13. On y représente les médianes des figures 4.16 et 4.17 normalisées par rapport aux RASEH. On moyenne ces courbes pour donner une allure générale de l'effet de la ductilité sur les RASIH. Pour les données historiques on remarque

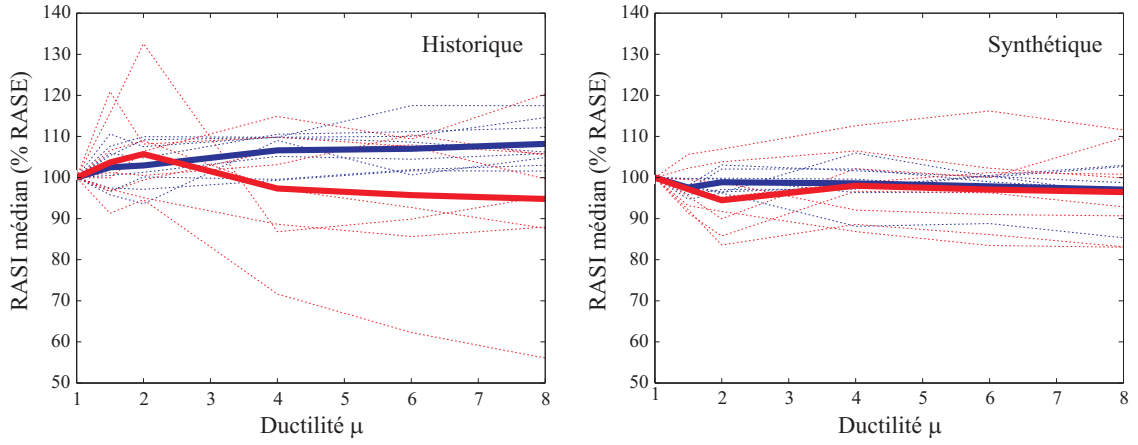


FIG. 4.13 : Variation des médianes des RASIH normalisées en fonction de la ductilité pour les données historiques et synthétiques et leurs moyennes. *Légende : bleu = Données de l'Est; rouge = Données de l'Ouest*

une légère hausse constante des rapports à l'Est (pente moyenne de 1.3%) et une légère baisse à l'Ouest (pente moyenne de -0.7%). Pour les données synthétiques, on note une très légère baisse des rapports à l'Est comme à l'Ouest (respectivement pente moyenne de -0.4% et -0.5%). De façon générale, on retiendra que la ductilité a peu d'effet sur les RASIH. Comme pour les RASEH, on note que les RASIH de l'Est sont supérieures à ceux de l'Ouest pour les artificiels (1.02 contre 0.87 pour $\bar{\rho}_H^{(\mu)}$ en moyenne) comme pour les historiques (0.98 contre 0.76 pour $\bar{\rho}_H^{(\mu)}$ en moyenne). Les RASIH synthétiques sont aussi supérieurs aux RASIH historiques (0.96 contre 0.91 sur l'ensemble des $\bar{\rho}_H^{(\mu)}$ en valeur médiane).

On retiendra de cette étude comparative que l'ordre des moyennes de calcul a peu d'effet

sur les valeurs des RASIH et que la ductilité a une faible influence sur les rapports d'amplitude. On illustre encore que les rapports de l'Est sont supérieurs à ceux de l'Ouest et que ceux synthétiques sont supérieurs à ceux historiques.

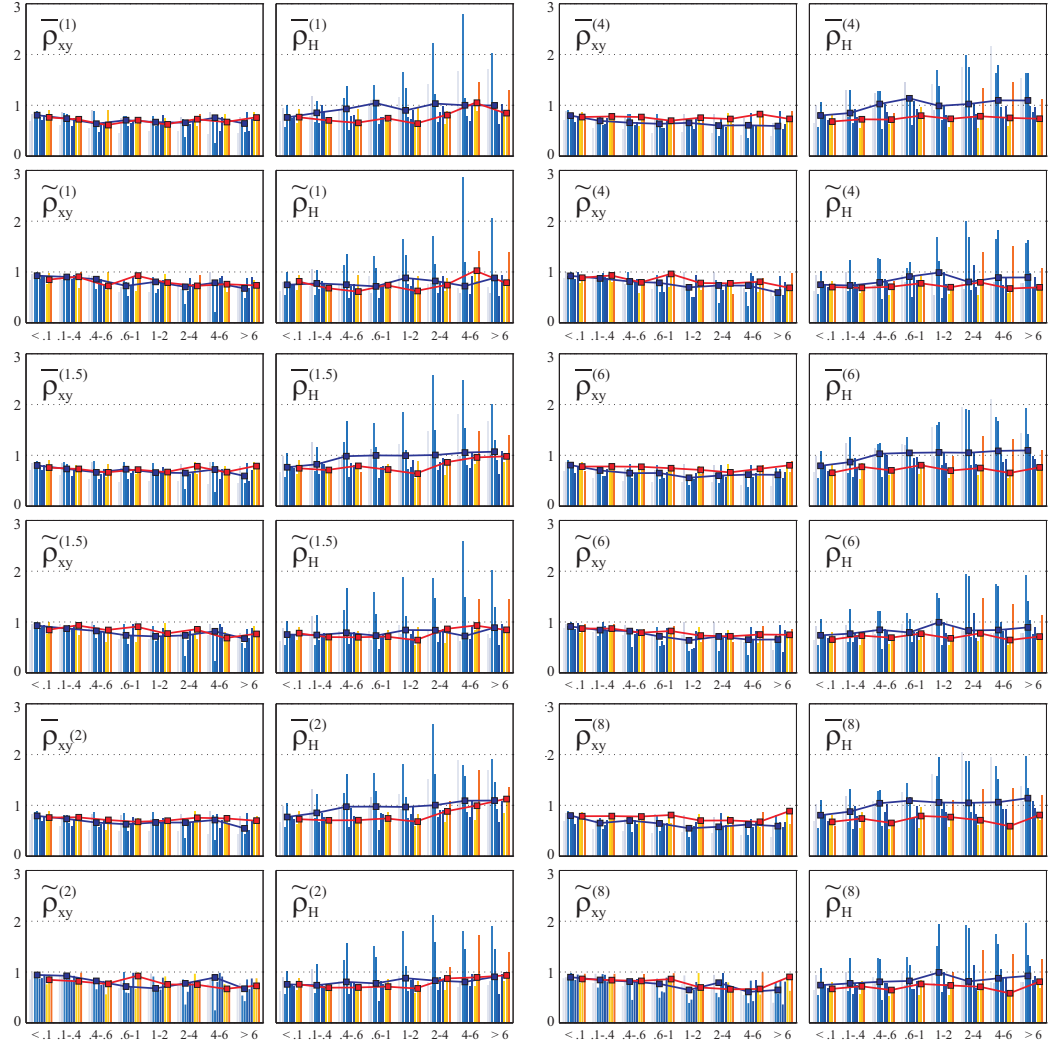


FIG. 4.14 : RASIH moyens des données historiques pour chaque famille (M, R) et ductilité μ en fonction de la période ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. *Légende : bleu = Groupements de l'Est ; orange = Groupements de l'Ouest*

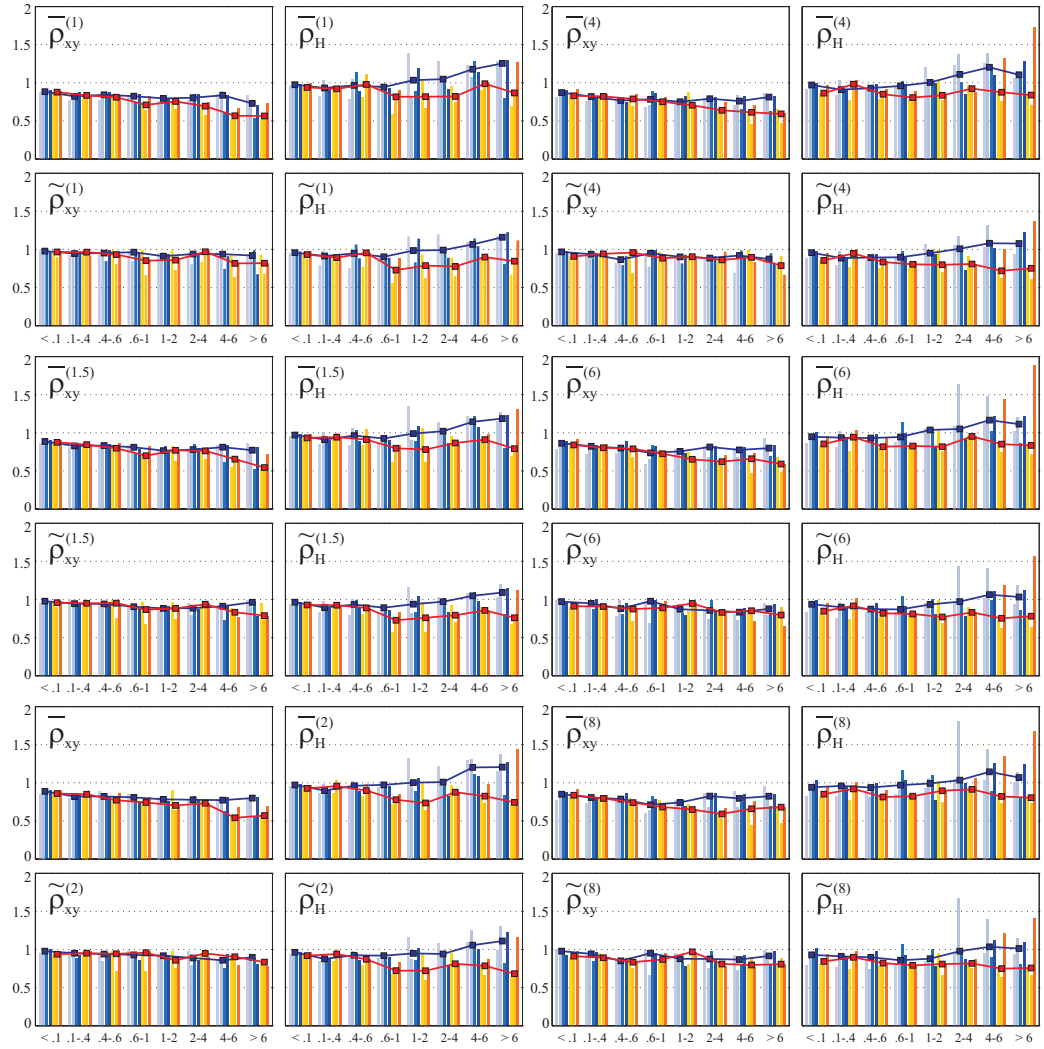


FIG. 4.15 : RASIH moyens des données synthétiques pour chaque famille (M, R) et ductilité μ en fonction de la période ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. *Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest*

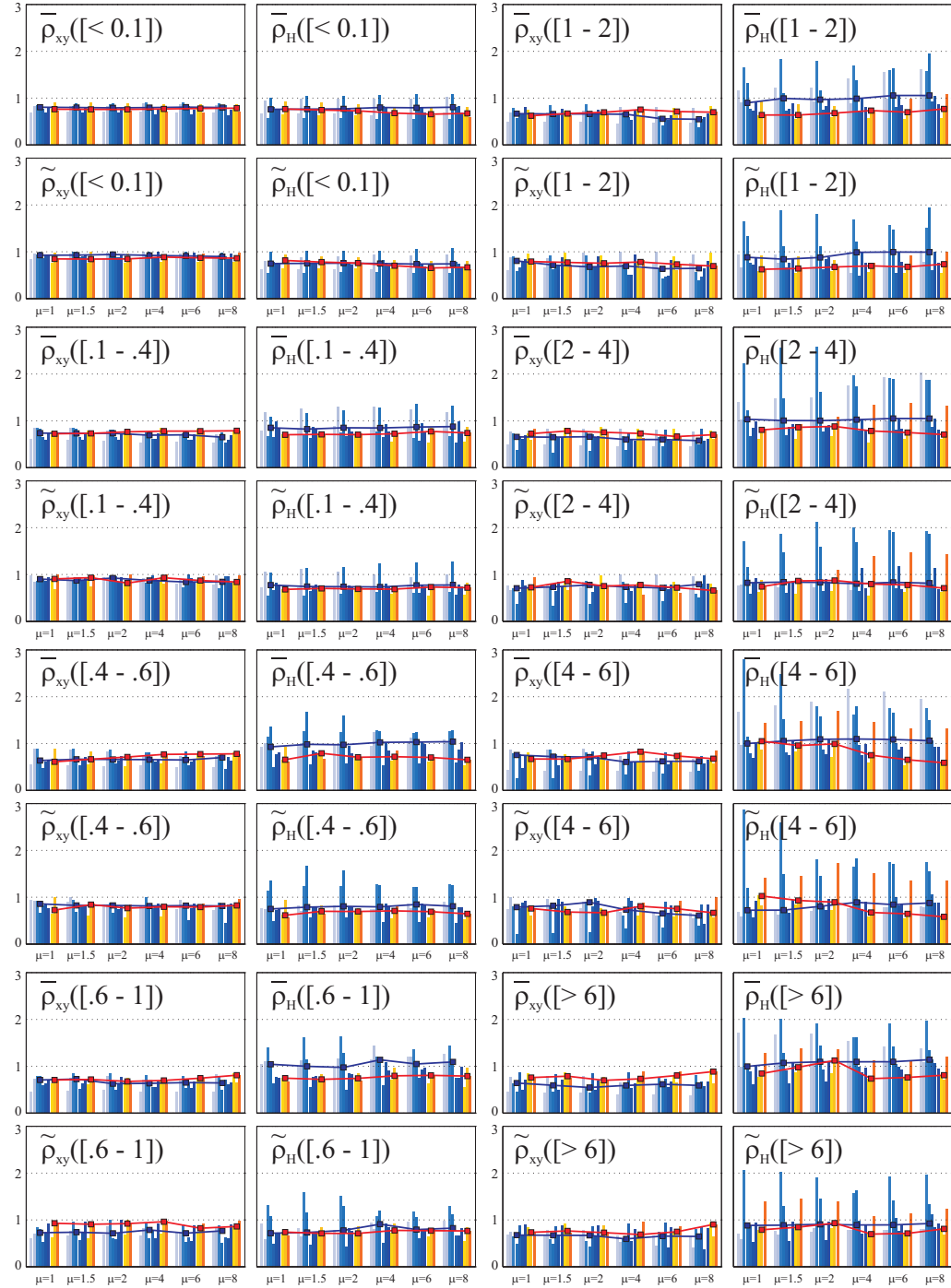


FIG. 4.16 : RASIH moyens des données historiques pour chaque famille (M, R) et classe de période en fonction de la ductilité ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. *Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest*

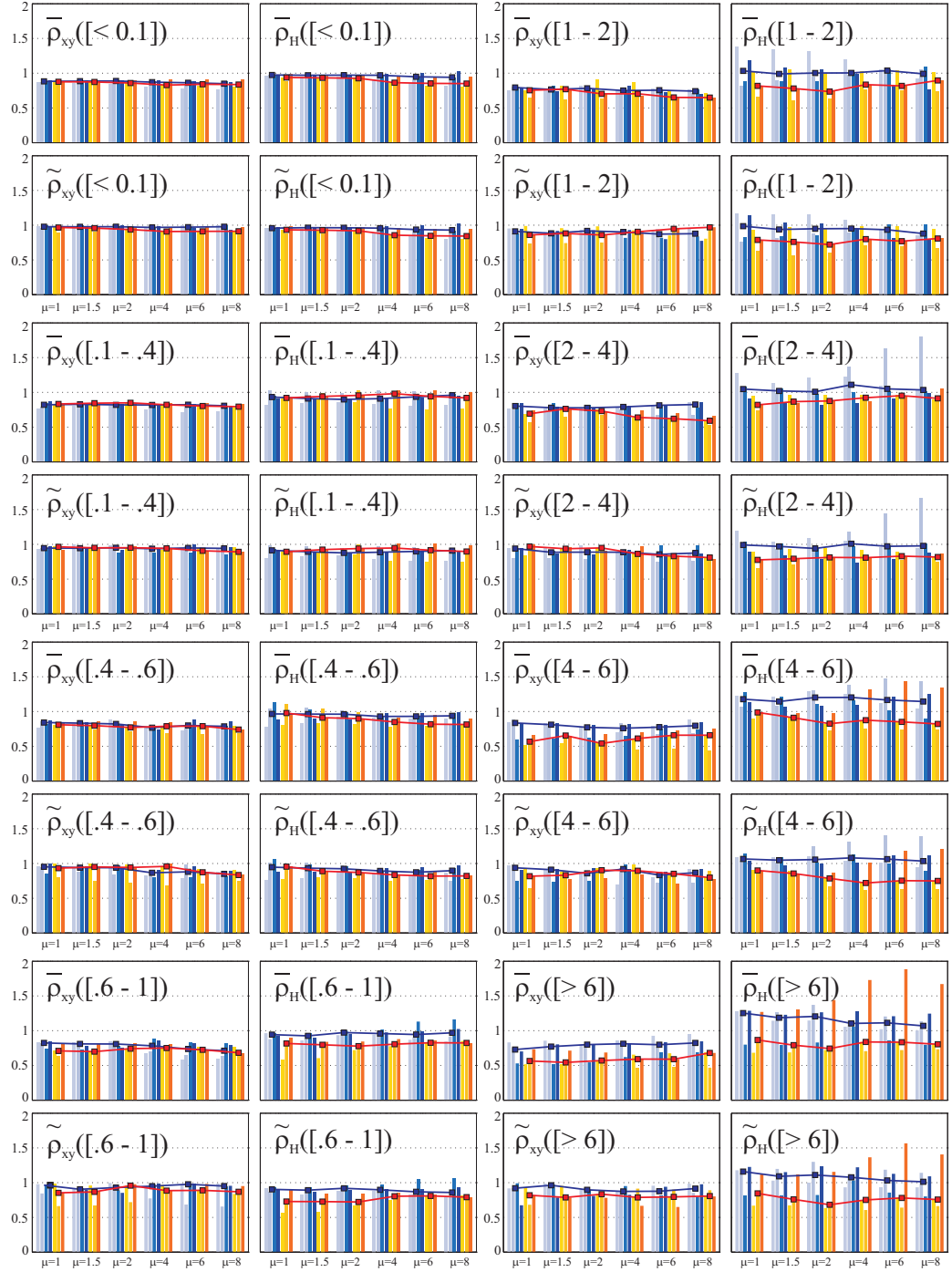


FIG. 4.17 : RASIH moyens des données synthétiques pour chaque famille (M, R) et classe de période en fonction de la ductilité ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest.
Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest

4.3.3 Rapports d'amplitude de spectres inélastiques verticaux (RASIV)

On développe de la même façon que précédemment un rapport d'amplitude de spectres inélastiques verticaux (RASIV) afin d'évaluer l'effet de la ductilité sur les rapports d'amplitude verticaux. On définit les RASIV pour une ductilité μ et une période T pour les séismes décorrélés et bruts par :

$$\rho_V^{(\mu)}(T) = \frac{A_V^{(\mu)}(T)}{A_{H_1}^{(\mu)}(T)} \quad (4.18)$$

$$\rho_z^{(\mu)}(T) = \frac{A_z^{(\mu)}(T)}{\max(A_x^{(\mu)}(T), A_y^{(\mu)}(T))} \quad (4.19)$$

Où $A_\ell^{(\mu)}$ est la pseudo-accélération spectrale inélastique dans la direction ℓ . On définit aussi deux types de moyennes sur un intervalle de période (basique et modifiée). Pour les séismes décorrélés on a :

$$\bar{\rho}_V^{(\mu)}([T_i..T_j]) = \text{moyenne}(\rho_V^{(\mu)}(T), [T_i..T_j]) \quad (4.20)$$

$$\tilde{\rho}_V^{(\mu)}([T_i..T_j]) = \frac{\text{moyenne}(A_V^{(\mu)}, [T_i..T_j])}{\text{moyenne}(A_{H_1}^{(\mu)}, [T_i..T_j])} \quad (4.21)$$

et pour les séismes bruts on a :

$$\bar{\rho}_z^{(\mu)}([T_i..T_j]) = \text{moyenne}(\rho_z(T), [T_i..T_j]) \quad (4.22)$$

$$\tilde{\rho}_z^{(\mu)}([T_i..T_j]) = \frac{\text{moyenne}(A_z^{(\mu)}, [T_i..T_j])}{\max(\text{moyenne}(A_x^{(\mu)}, [T_i..T_j]), \text{moyenne}(A_y^{(\mu)}, [T_i..T_j]))} \quad (4.23)$$

On retrouve en annexe IV les valeurs des RASIV basiques des séismes groupés par couple (M, R). Pour collecter ces valeurs, on moyenne la variable $\rho_\ell^{(\mu)}(T)$, où $\ell = V$ ou z , pour tous les N séismes du même groupement m . On obtient :

$$\underline{\rho}_{\ell m}^{(\mu)}(T) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \rho_\ell^{(\mu)}(T) ; \quad \ell = V \text{ ou } z \quad (4.24)$$

On procède de la même façon que pour $\rho_\ell^{(\mu)}(T)$ pour calculer $\bar{\rho}_{\ell m}^{(\mu)}([T_i..T_j])$ et $\tilde{\rho}_{\ell m}^{(\mu)}([T_i..T_j])$. Les histogrammes 4.19 et 4.20 résument les variations des rapports $\bar{\rho}_z^{(\mu)}$, $\tilde{\rho}_z^{(\mu)}$, $\bar{\rho}_V^{(\mu)}$ et $\tilde{\rho}_V^{(\mu)}$ pour chaque groupement (M, R) en fonction du domaine de périodes ou de la ductilité pour les données historiques et synthétiques. On représente sur ces histogrammes les médianes de ces rapports pour l'Est (en bleu) et pour l'Ouest (en rouge). On rappelle encore que les histogrammes sont rangés par famille de gauche à droite dans l'ordre énoncé aux chapitres 2.4.3 et 2.4.4.

On remarque encore une fois que nos résultats pour $\mu = 1$ sont similaires à ceux du chapitre 3.4.3 ce qui signifie que l'ordre des moyennes n'a pas d'influence non plus. Les deux définitions de rapports moyens ($\bar{\rho}^{(\mu)}$ et $\tilde{\rho}^{(\mu)}$) présentent les mêmes caractéristiques. On notera, là encore, que les rapports modifiés donnent des valeurs plus faibles que les rapports basiques (3,4% plus faible pour les données historiques de l'Est et de l'Ouest). En général, les RASIV sont plus faibles que les RASIH. Les rapports verticaux de l'Est sont nettement supérieurs à ceux de l'Ouest pour chaque ductilité. La variation des rapports en fonction de la ductilité est présentée à la figure 4.18.

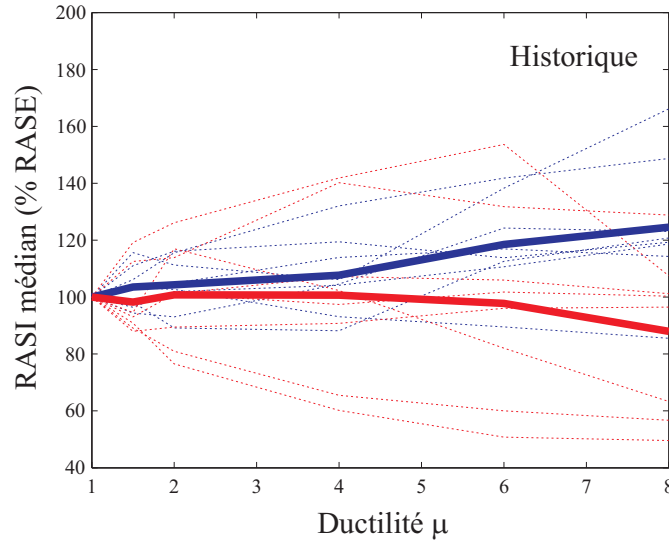


FIG. 4.18 : Variation des médianes des RASIV normalisées en fonction de la ductilité pour les données historiques et leurs moyennes. *Légende : bleu = Données de l'Est ; rouge = Données de l'Ouest*

On y représente les médianes de la figure 4.19 normalisées par rapport aux RASEV. On moyenne ces courbes pour donner une allure générale de l'effet de la ductilité sur les RASIV. On note une variation plus importante sur les RASIV que sur les RASIH. À l'Est, la ductilité a tendance à faire augmenter le RASIV (pente moyenne de 3.4%) alors qu'à l'Ouest la ductilité semble réduire ce même rapport (pente moyenne de -1.1%).

On retiendra donc des RASIV, qu'ils sont plus faibles que les RASIH, qu'ils croient en fonction de la ductilité à l'Est alors qu'ils décroissent à l'Ouest et qu'ils sont nettement supérieurs à l'Est qu'à l'Ouest.

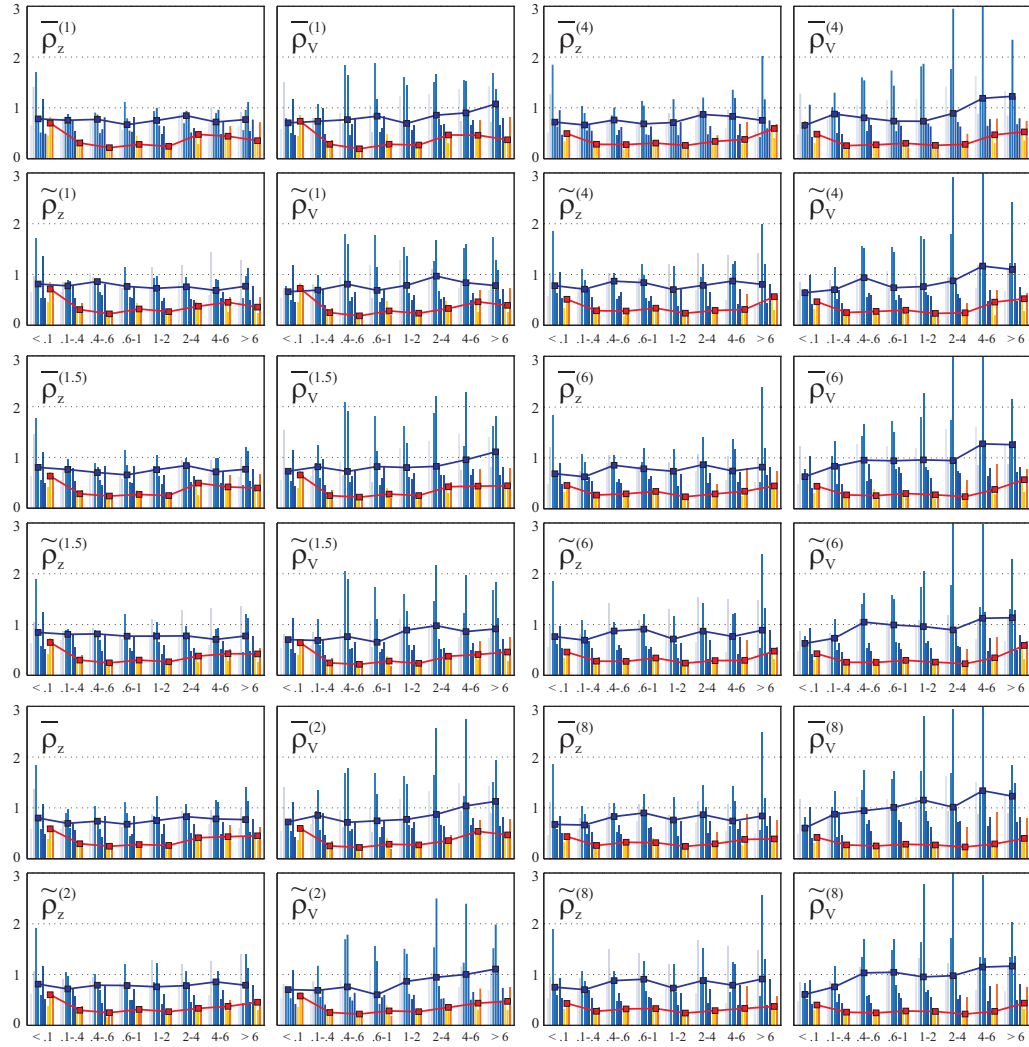


FIG. 4.19 : RASIV moyens des données historiques pour chaque famille (M, R) et ductilité μ en fonction de la période ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. *Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest*

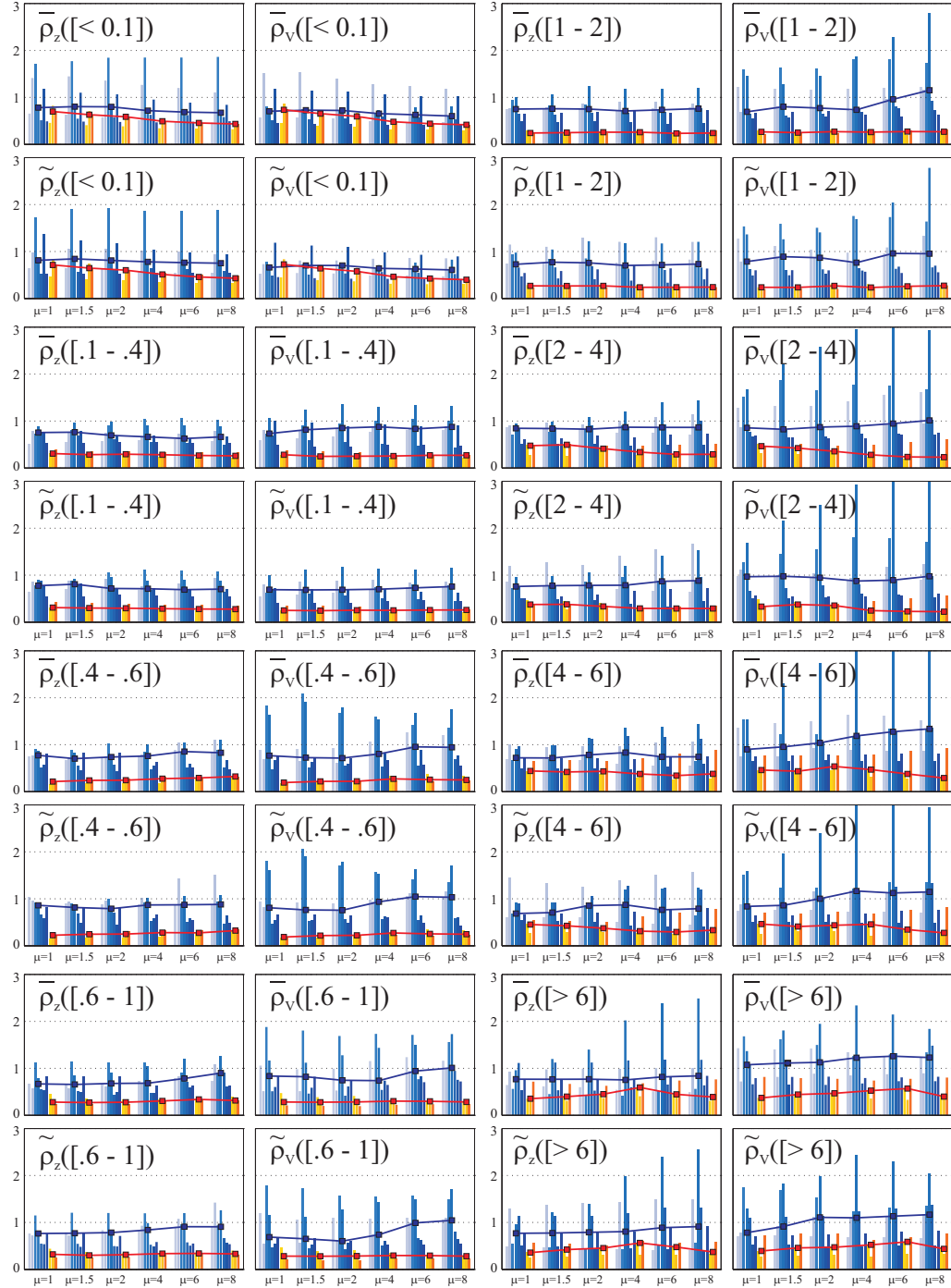


FIG. 4.20 : RASIV moyens des données historiques pour chaque famille (M, R) et classe de période en fonction de la ductilité ainsi que leurs médianes pour l'Est et l'Ouest. *Légende : bleu = Groupements de l'Est; orange = Groupements de l'Ouest*

4.4 Conclusion

Une large étude sur les spectres non-linéaires et leurs caractéristiques a été effectuée dans ce chapitre. Il a, dans un premier temps, décrit et validé le fonctionnement de l'utilitaire de calcul RSPECTRUM pour les spectres non-linéaires et détaillé l'algorithme *RNonLin* permettant de converger rapidement vers le spectre cible à ductilité constante. Le langage de programmation TCL&TK ainsi que le programme de structure OPENSEES ont été retenus pour des raisons de rapidité et de fiabilité.

Dans un deuxième temps, ce chapitre a présenté les spectres non-linéaires des séismes de notre base de données. Il a montré que la ductilité avait tendance à réduire les spectres non-linéaires. Ceci confirme qu'une structure ductile permet de diminuer les efforts de cisaillement à sa base. On a vu que les spectres inélastiques de l'Ouest avaient toujours un contenu fréquentiel plus faible que ceux de l'Est. On a aussi observé que la décorrélation avait les mêmes effets sur les spectres non-linéaires que sur les spectres élastiques. Elle sépare toujours les spectres horizontaux et réduit le spectre vertical.

Enfin, ce chapitre a calculé et présenté les rapports d'amplitude des spectres inélastiques horizontaux (RASIH) et verticaux (RASIV). On retient de ces résultats que la ductilité a peu d'effet sur les RASIH. On observe des RASIH plus élevés à l'Est qu'à l'Ouest aussi bien pour les données historiques (0.98 contre 0.76) qu'artificielles (1.02 contre 0.87). Les rapports synthétiques sont aussi supérieurs à ceux historiques (0.96 contre 0.91). En ce qui concerne les RASIV, la ductilité semble augmenter légèrement les RASIV de l'Est (pente de 3.4%) et réduire ceux de l'Ouest (pente de -1.1%). Ces rapports sont encore nettement plus important à l'Est qu'à l'Ouest (0.90 contre 0.30).

Dans la prochaine partie, on s'intéressera au facteur de réduction de force sismique R_y (ou R) permettant d'évaluer la diminution de la force de cisaillement lorsque l'on permet à une structure un comportement non-linéaire.

CHAPITRE 5

FACTEURS DE RÉDUCTION DE LA FORCE SISMIQUE

5.1 Introduction

Tel que présenté au paragraphe 2.7, les normes sismiques modernes considèrent deux types de facteurs de réduction de la force sismique : l'un lié à la surcapacité des matériaux R_0 et l'autre à la ductilité de la structure R_d . Dans ce chapitre, on s'intéresse uniquement au facteur R_d que l'on notera dorénavant R pour alléger le texte.

L'objectif de ce chapitre est de caractériser le facteur de réduction de la force sismique R en fonction de la période T , de la ductilité en déplacement μ et de la situation géographique pour des séismes typiques de l'Amérique du Nord. On présentera dans un premier temps la méthodologie de calcul du facteur R et les résultats des facteurs R obtenus à partir de l'analyse des séismes historiques et synthétiques typiques de l'Amérique du Nord. On étudiera dans un deuxième temps l'effet de la décorrélation stochastique sur les relations R - μ - T . Les courbes R - μ - T des séismes étudiés sont ensuite analysés statistiquement et comparées aux prédictions des formules simplifiées proposées par d'autres chercheurs, ainsi qu'aux prédictions de nouvelles formules développées dans le cadre de ce travail pour tenir compte des spécificités de l'aléa sismique au Canada. Les nouvelles formules prennent en compte la situation géographique du site dans un premier temps, puis l'effet du sol et la rigidité post-élastique dans un deuxième temps.

5.2 Calcul du facteur de réduction de la force sismique

Considérons un Système à un Degrés de Liberté (SDL) nonlinéaire ayant une période fondamentale T et une ductilité μ . Sous l'effet d'un séisme, on définit le facteur de réduction de la force sismique R par le rapport entre la force de cisaillement V_{elas} maximale du système équivalent élastique et la force de cisaillement V_{inel} maximale du système

non-linéaire à la plastification.

$$R = \frac{\max(V_{elas}(t))}{\max(V_{inel}(t))} \quad (5.1)$$

$$= \frac{\max(m \times a_{elas}(t))}{\max(m \times a_{inel}(t))} \quad (5.2)$$

$$= \frac{\max(a_{elas}(t))}{\max(a_{inel}(t))} \quad (5.3)$$

où m est la masse du SSDL et $a_{elas}(t)$ et $a_{inel}(t)$ sont les accélérations relatives de la masse du SSDL élastique et inélastique, respectivement. On retrouve ici les définitions des spectres d'accélération relative linéaire et non-linéaire. On déduit donc la valeur de R

$$R = \frac{A^{(1)}(T)}{A^{(\mu)}(T)} \quad (5.4)$$

On retrouve la même expression que le paramètre R_y définit à l'équation (2.29). Le calcul de ce paramètre a déjà été effectué lors de la construction des spectres non-linéaires. Ainsi, pour calculer le facteur de réduction de force R pour une période donnée, il suffit d'inverser la valeur de \bar{f}_y déterminée par l'algorithme de convergence décrit au paragraphe 4.2.2 de ce mémoire.

5.3 Facteurs de réduction de force des séismes historiques

5.3.1 Les données historiques brutes

Les résultats des facteurs de réduction sont représentés en fonction de la ductilité μ et de la période T . On parlera de graphique R - μ - T . La figure 5.1 est un exemple de courbes R - μ - T . On y représente les facteurs R des trois composantes x , y et z du sismographe de données historiques brutes (*idest* non-décorrélées) pour une ductilité de 4. On regroupe sur cette figure les facteurs de la 1^{ère} famille (M_w , R_e) de l'Est. On illustre ensuite la courbe R - μ - T moyenne du groupe pour chaque composante. On présente enfin les rapports des

R - μ - T moyens notés ν_{xy} et ν_z et définis par :

$$\nu_{xy}^{(\mu)}(T) = \frac{R_y^{(\mu)}(T)}{R_x^{(\mu)}(T)} \quad (5.5)$$

$$\nu_z^{(\mu)}(T) = \frac{R_z^{(\mu)}(T)}{R_x^{(\mu)}(T)} \quad (5.6)$$

où $R_\ell^{(\mu)}(T)$ est le facteur de réduction de force de la composante sismique selon la direction ℓ pour une ductilité μ et une période T .

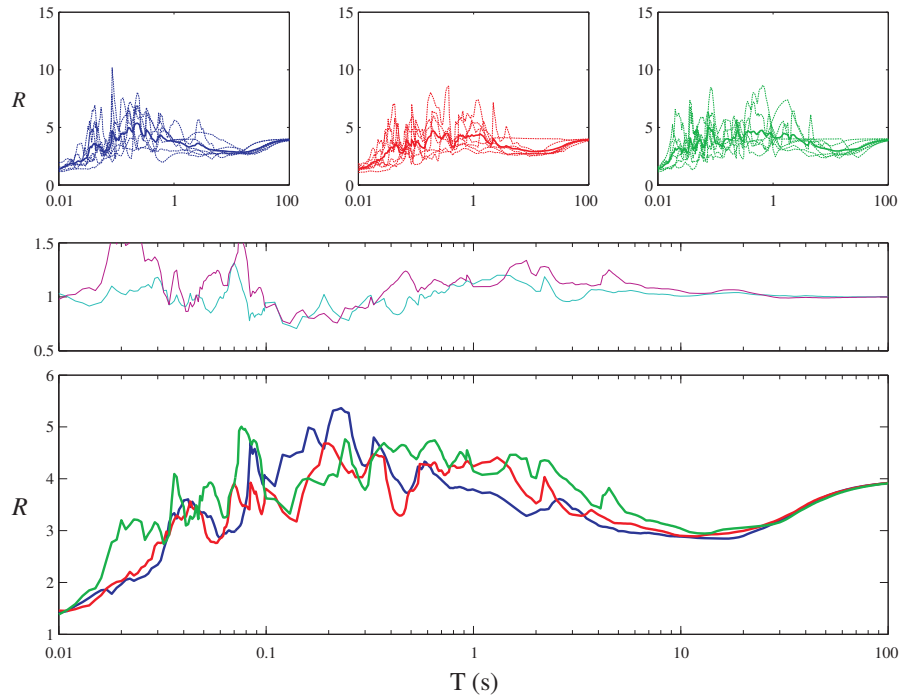


FIG. 5.1 : R - μ - T des données historiques brutes pour la famille 1 de l'Est avec $\mu = 4$.
Légende : bleu = composante x ; rouge = composante y ; vert = composante z ; cyan = ν_{xy} ; magenta = ν_z

On note que pour tous les séismes historiques étudiés, les rapports ν oscillent autour de l'unité, ce qui signifie que les facteurs de réduction de force sont du même ordre selon les trois directions du sismographe. Autrement dit, les composantes d'un séisme n'influencent pas de manière significative le facteur R .

On remarque tout d'abord que les $R-\mu-T$ tendent vers la valeur de la ductilité pour les grandes périodes ($T > 10\text{ s}$) et valent 1 pour $T = 0$. Ces valeurs limites sont directement liées à la définition du facteur R . En effet pour $T = 0$, on a :

$$R(0) = \frac{\text{PGA}}{\text{PGA}} = 1 \quad (5.7)$$

Pour $T = \infty$, la structure est infiniment flexible et les déplacements relatifs maximaux sont ceux du sol. Ainsi les déplacements élastiques et inélastiques sont identiques. On se trouve alors sous l'hypothèse des déplacements égaux ce qui donne $R(\infty) = \mu$.

Les variations du paramètre R sont identiques pour toutes les ductilités et toutes les familles de séismes. Seules leur intensité et leur plage de période varient. Généralement le facteur de réduction croît uniformément, oscille autour de la valeur de la ductilité μ , présente une bosse, chute en dessous de cette valeur puis croît de nouveau vers μ en valeur limite. Pour les ductilités faibles ou pour les séismes de l'Ouest, la chute du paramètre R est négligeable. Par contre, pour les familles de l'Est et pour des ductilités supérieures à 2, ce phénomène est très souvent observé. Dans ce mémoire, on nommera ce phénomène "l'effet de trou" du facteur de réduction de force.

Les figures 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 illustrent cet effet pour différentes familles de séismes de l'Est (familles 2 et 4) et de l'Ouest (familles 1 et 3) et pour des ductilités différentes ($\mu = 2$ et 6). On observe bien les mêmes variations des $R-\mu-T$ et l'on illustre bien l'effet de trou pour les groupements de l'Est.

Afin de prouver que cet effet de trou était une particularité des secousses de l'Est, on compare à la figure 5.6 les graphiques $R-\mu-T$ moyens de tous les accélérographes de l'Est avec ceux de tous les accélérographes de l'Ouest. On remarque des différences flagrantes :

- Les graphiques $R-\mu-T$ de l'Est croient plus rapidement que ceux de l'Ouest.
- Les $R-\mu-T$ de l'Est présentent un palier de l'ordre de la ductilité de calcul entre les périodes 0.2 et 3 secondes alors que ceux de l'Ouest ont une "bosse" dépassant la ductilité entre les périodes 2 et 25 secondes

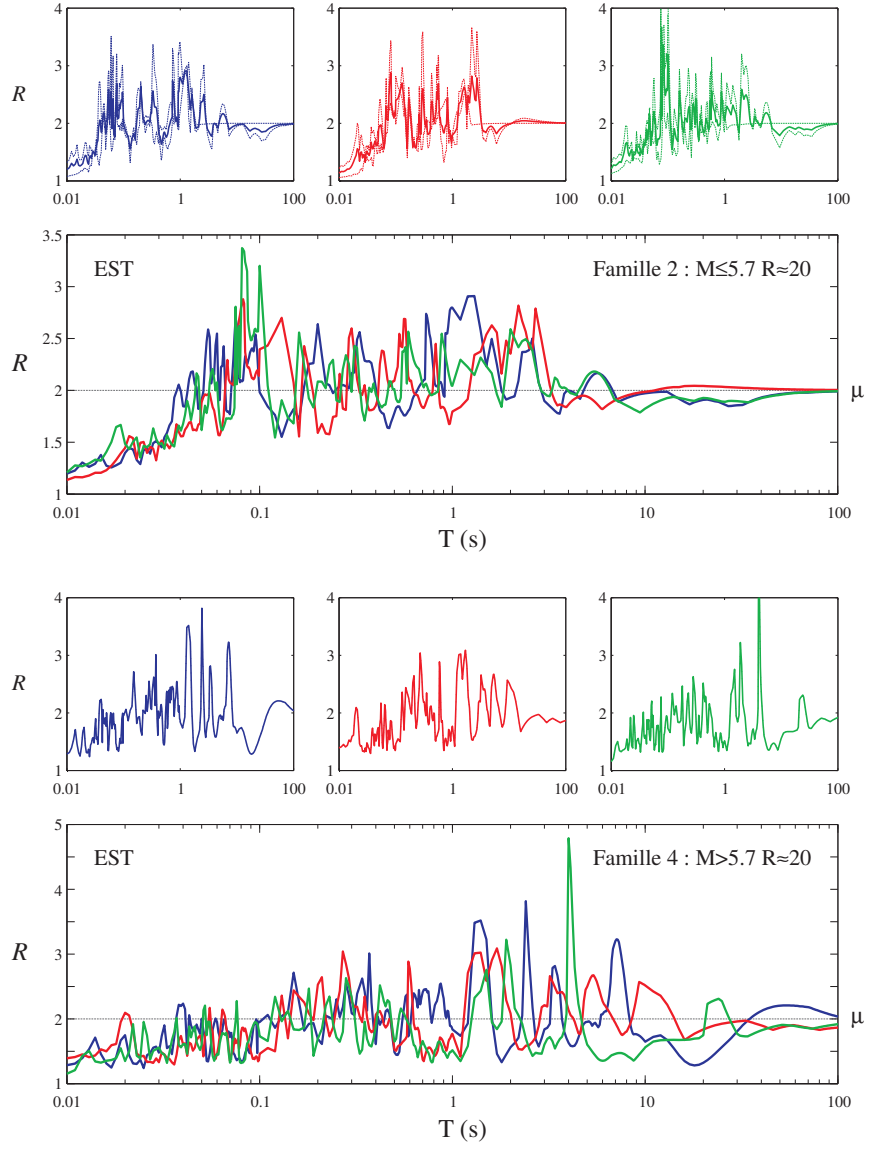


FIG. 5.2 : R - μ - T moyens des données historiques pour les familles 2 et 4 de l'Est pour $\mu = 2$. Légende : bleu = composante x ; rouge = composante y ; vert = composante z

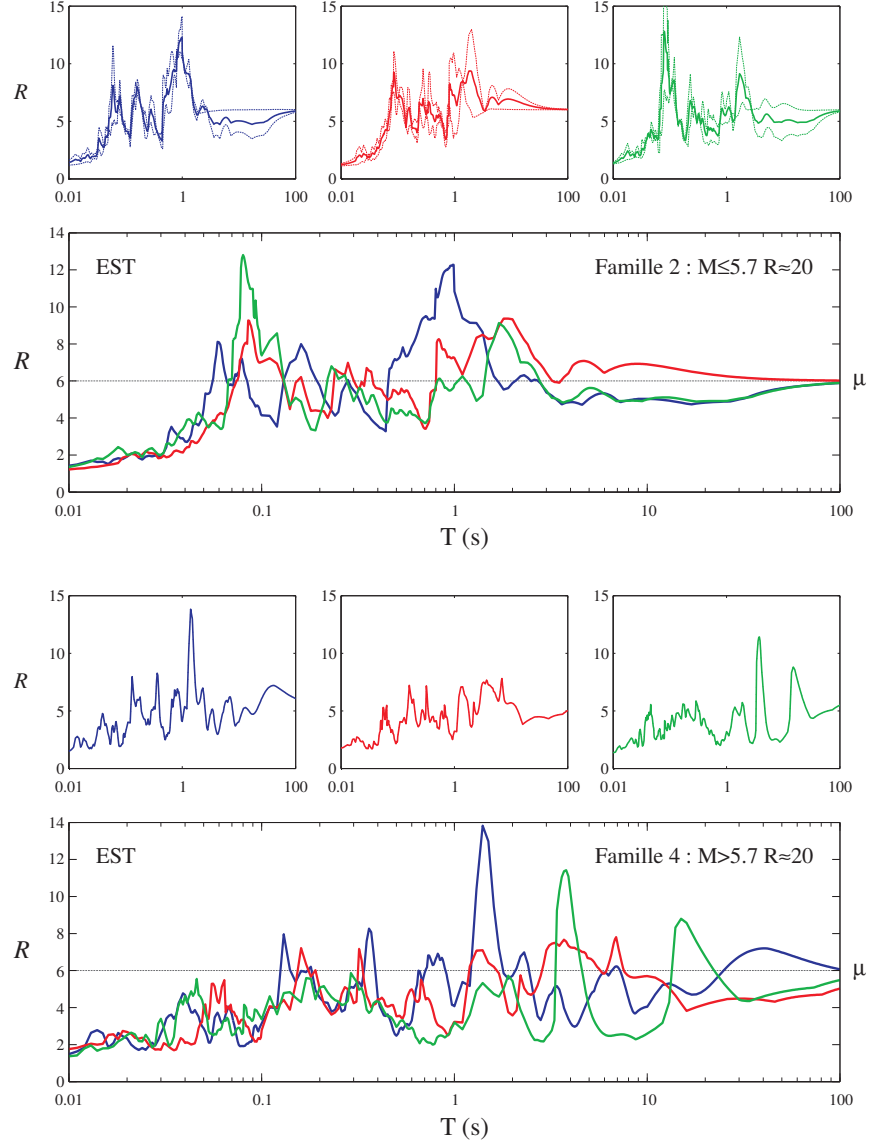


FIG. 5.3 : R - μ - T moyens des données historiques pour les familles 2 et 4 de l'Est pour $\mu = 6$. Légende : bleu = composante x ; rouge = composante y ; vert = composante z

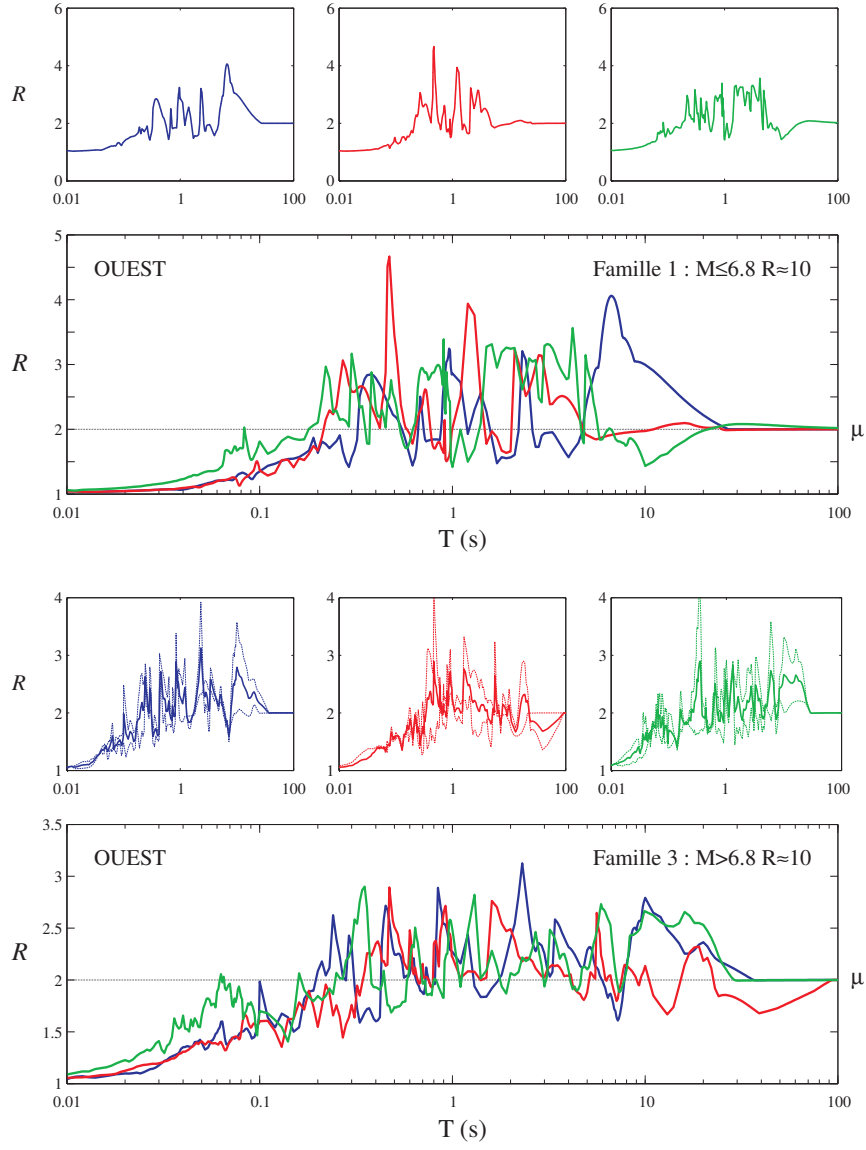


FIG. 5.4 : R - μ - T moyens des données historiques pour les familles 1 et 3 de l'Ouest pour $\mu = 2$. Légende : bleu = composante x ; rouge = composante y ; vert = composante z

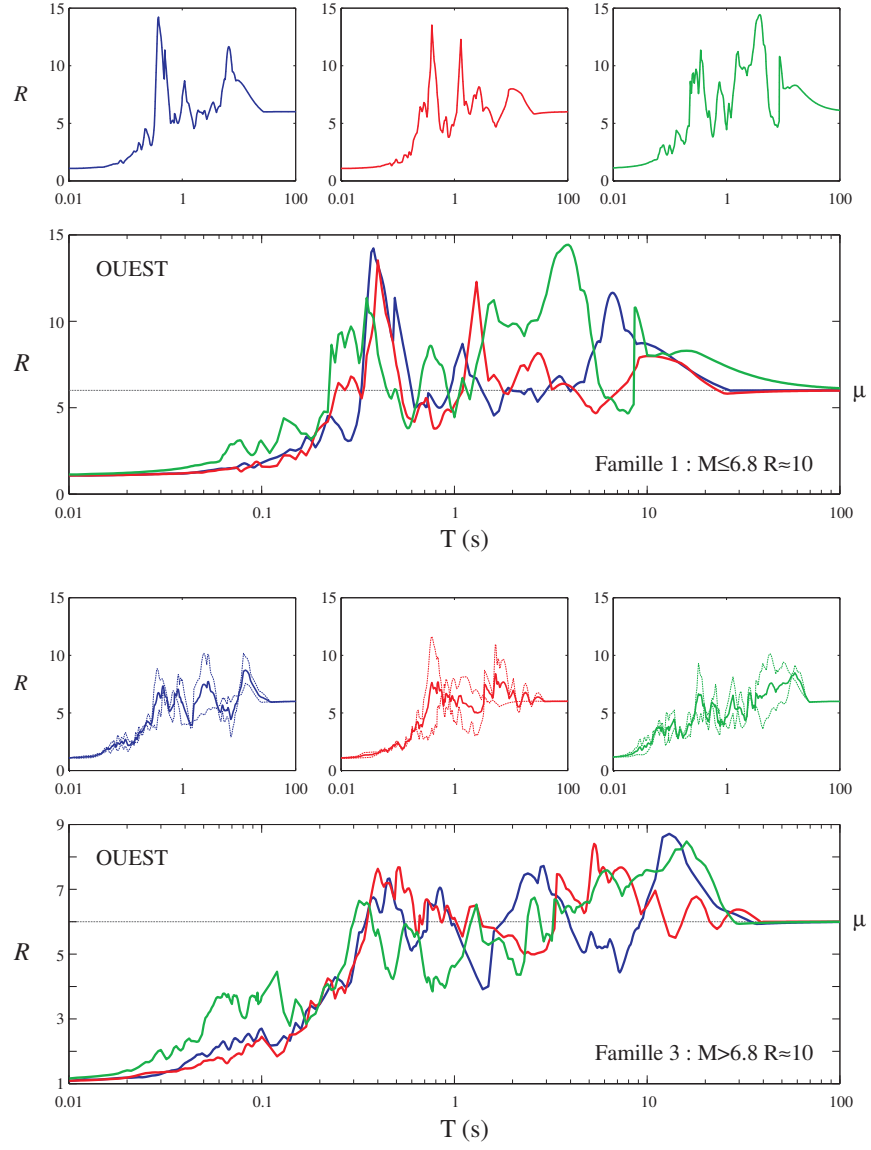


FIG. 5.5 : R - μ - T moyens des données historiques pour les familles 1 et 3 de l'Ouest pour $\mu = 6$. Légende : bleu = composante x ; rouge = composante y ; vert = composante z

- Les R - μ - T de l'Est chutent brutalement sous la valeur de la ductilité sur la plage de période de 3 à 50 secondes avant de converger vers la ductilité de calcul par défaut alors que les R - μ - T de l'Ouest ne présentent qu'une faible décroissance et convergent vers la ductilité de calcul par excès.

On montre ainsi que la différence de nature des secousses sismiques du Nord-Est du continent Américain a une influence non-négligeable sur le facteur de réduction de force sismique. Ainsi les formules empiriques données par Nassar et Krawinkler 1991 ou par Miranda 1993 ne conviendront pas au contexte sismique de l'Est Américain.

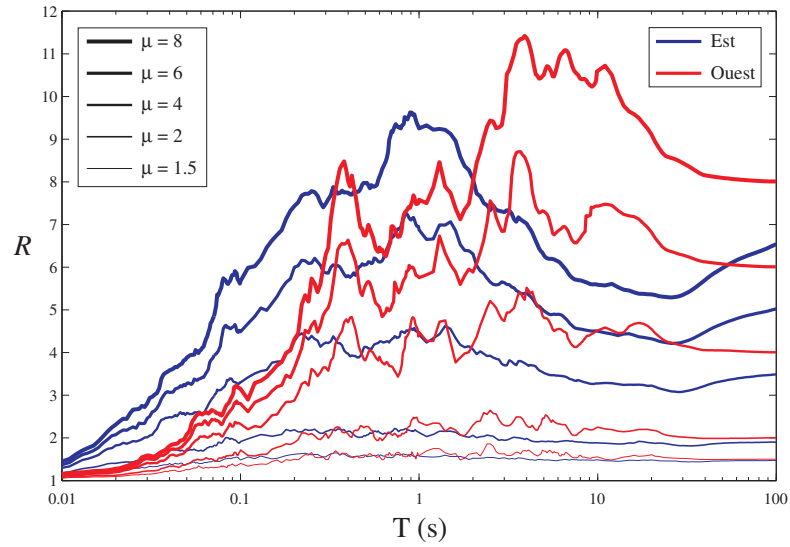


FIG. 5.6 : R - μ - T moyens des données historiques brutes pour l'Est et pour l'Ouest. *Légende : bleu = R - μ - T moyen de l'Est; rouge = R - μ - T moyen de l'Ouest*

5.3.2 Les données historiques décorrélées

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à l'influence de la décorrélation sur le facteur de réduction de force R , que l'on notera dans le cas décorrélé \bar{R} . On calcule \bar{R} de la même façon que R en utilisant les accélérogrammes décorrélés par le processus décrit au paragraphe 2.5. On obtient donc des \bar{R} - μ - T dans les directions majeure, intermédiaire et mineure. On procède à une moyenne de ces facteurs de réduction sur les groupements de séismes

définis au paragraphe 2.4.3. On définit, là encore, les rapports entre les composantes des \bar{R} - μ - T moyens notés ν_H et ν_V :

$$\nu_H^{(\mu)}(T) = \frac{\bar{R}_2^{(\mu)}(T)}{\bar{R}_1^{(\mu)}(T)} \quad (5.8)$$

$$\nu_V^{(\mu)}(T) = \frac{\bar{R}_V^{(\mu)}(T)}{\bar{R}_1^{(\mu)}(T)} \quad (5.9)$$

où $\bar{R}_\ell^{(\mu)}(T)$ est le facteur de réduction dans la direction ℓ des données décorréelées pour une ductilité μ et une période T .

On présente sur la figure 5.7 le même exemple qu'au paragraphe 5.3.1 avec des données décorréelées. On remarque à première vue que les graphiques sont similaires. Cependant on note moins de variation sur ν_H et ν_V que sur ν_{xy} et ν_z . Les graphiques \bar{R} - μ - T des différentes composantes sont plus rapprochés entre eux. On remarque aussi une atténuation de "l'effet de trou" bien qu'il soit toujours présent.

Afin de quantifier les différences entre R - μ - T et \bar{R} - μ - T , on introduit la distance Λ entre les courbes brutes et décorréelées. Cette dernière variable mathématique est définie par :

$$\Lambda_{[F\ell]}^{(\mu)} = \frac{\int_0^{100} |R_{[F\ell]}^{(\mu)}(T) - \bar{R}_{[F\ell]}^{(\mu)}(T)| dT}{\int_0^{100} R_{[F\ell]}^{(\mu)}(T) dT} \quad (5.10)$$

où $R_{[F\ell]}^{(\mu)}(T)$ et $\bar{R}_{[F\ell]}^{(\mu)}(T)$ sont respectivement les facteurs de réduction moyens de la famille $[F\ell]$ des données brutes et décorréelées pour une ductilité μ et une période T .

Le tableau 5.1 présente les valeurs de Λ pour chaque groupement de séismes historiques de l'Est et de l'Ouest. On note que les effets de la décorrélation sont relativement faibles pour les R - μ - T calculés avec des ductilités inférieures ou égales à 2. L'effet augmente avec la ductilité. Pour certaine famille la valeur de Λ peut atteindre jusqu'à 20%. C'est le cas de la famille 5 de l'Est. Les R - μ - T et \bar{R} - μ - T de cette famille sont représentés à la figure 5.8. On remarque que les variations apparaissent pour des périodes élevées et tendent

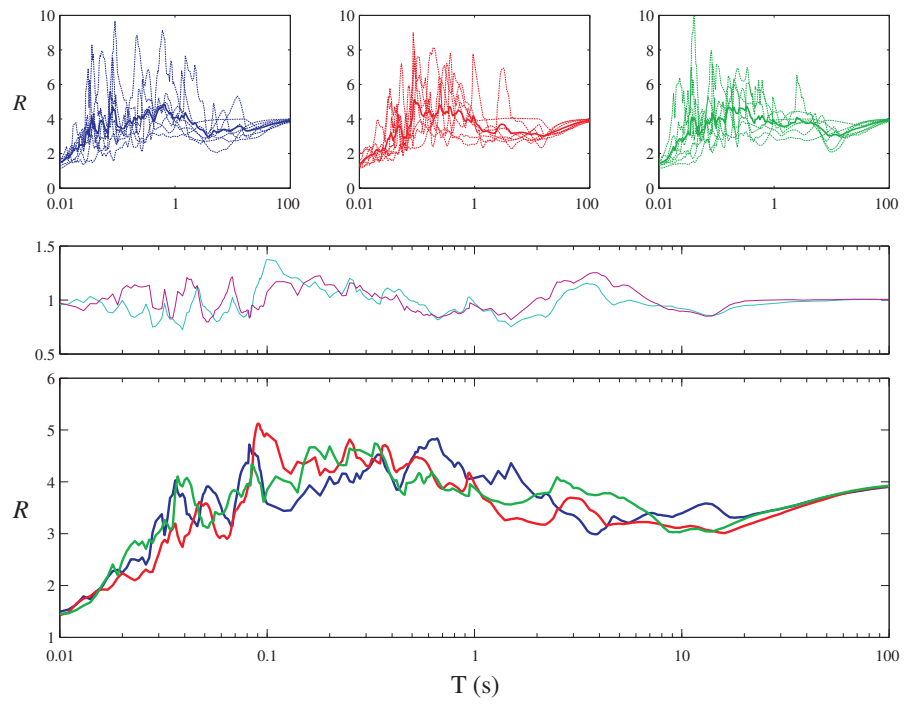


FIG. 5.7 : \bar{R} - μ - T des données historiques décorréées pour la famille 1 de l'Est avec $\mu = 4$. Légende : *bleu* = composante horizontale majeure ; *rouge* = composante horizontale mineure ; *vert* = composante verticale ; *cyan* = ν_H ; *magenta* = ν_V

à réduire "l'effet de trou". On remarque qu'à l'Ouest l'effet de la décorrélation est bien moins important qu'à l'Est avec des valeurs de Λ ne dépassant pas les 4%.

En résumé on peut retenir que la décorrélation n'a d'effet que sur les graphiques $R-\mu-T$ calculés avec de grande ductilité (≥ 4) et que cet effet est plus important sur les $R-\mu-T$ de l'Est que de l'Ouest. On notera enfin que les $\bar{R}-\mu-T$ de données décorrélées réduisent "l'effet de trou" observé au paragraphe 5.3.1.

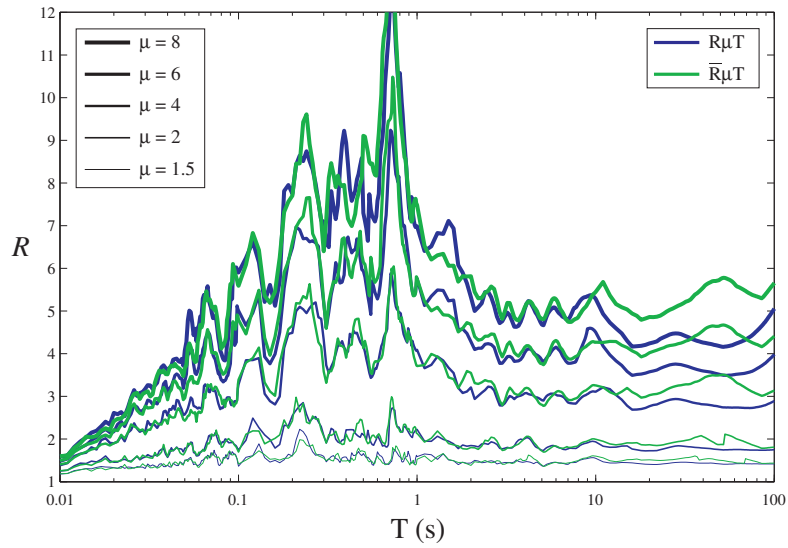


FIG. 5.8 : $R-\mu-T$ et $\bar{R}-\mu-T$ des données historiques de la famille 5 de l'Est. *Légende : bleu = $R-\mu-T$; vert = $\bar{R}-\mu-T$*

5.4 Résultat des données synthétiques

5.4.1 Les données synthétiques brutes

Après avoir étudié les facteurs de réduction de force des données historiques, on se penche dans cette section sur l'analyse des données synthétiques. En gardant la même logique que précédemment, on calcule des graphiques $R-\mu-T$ pour des secousses horizontales selon deux directions (x et y). On définit toujours le rapport ν_{xy} (équation (5.5)) entre les graphiques $R-\mu-T$ des directions x et y . Là encore, on regroupera ces courbes $R-\mu-T$ en

Tableau 5.1 Distance Λ entre les graphiques R - μ - T brut et décorrélé historiqu s.

(M, R)	$\Lambda^{(1.5)}$	$\Lambda^{(2)}$	$\Lambda^{(4)}$	$\Lambda^{(6)}$	$\Lambda^{(8)}$
Est $M_w \leq 5.7$ $R \approx 5$	0.0084	0.0167	0.0301	0.0375	0.0419
Est $M_w \leq 5.7$ $R_e \approx 20$	0.0174	0.0342	0.0805	0.1040	0.1193
Est $M_w > 5.7$ $R_e \approx 5$	0.0396	0.0707	0.1163	0.1481	0.1676
Est $M_w > 5.7$ $R_e \approx 20$	0.0246	0.0619	0.1033	0.1202	0.1324
Est $M_w > 5.7$ $R_e \approx 50$	0.0428	0.0773	0.1380	0.1736	0.1982
Est $M_w > 5.7$ $R_e \approx 90$	0.0239	0.0511	0.0894	0.1102	0.1310
Est $M_w > 5.7$ $R_e > 90$	0.0304	0.0627	0.1041	0.1163	0.1320
Ouest $M_w \leq 6.8$ $R_e \approx 10$	0.0175	0.0202	0.0393	0.0372	0.0380
Ouest $M_w \leq 6.8$ $R_e \approx 20$	0.0179	0.0180	0.0326	0.0371	0.0229
Ouest $M_w > 6.8$ $R_e \approx 10$	0.0097	0.0132	0.0171	0.0182	0.0193

familles afin de construire des R - μ - T moyens. Les figures 5.9 et 5.10 présentent respectivement les R - μ - T de la famille 2 de l'Ouest pour une ductilité de 6 et de la famille 1 de l'Est pour une ductilité de 8.

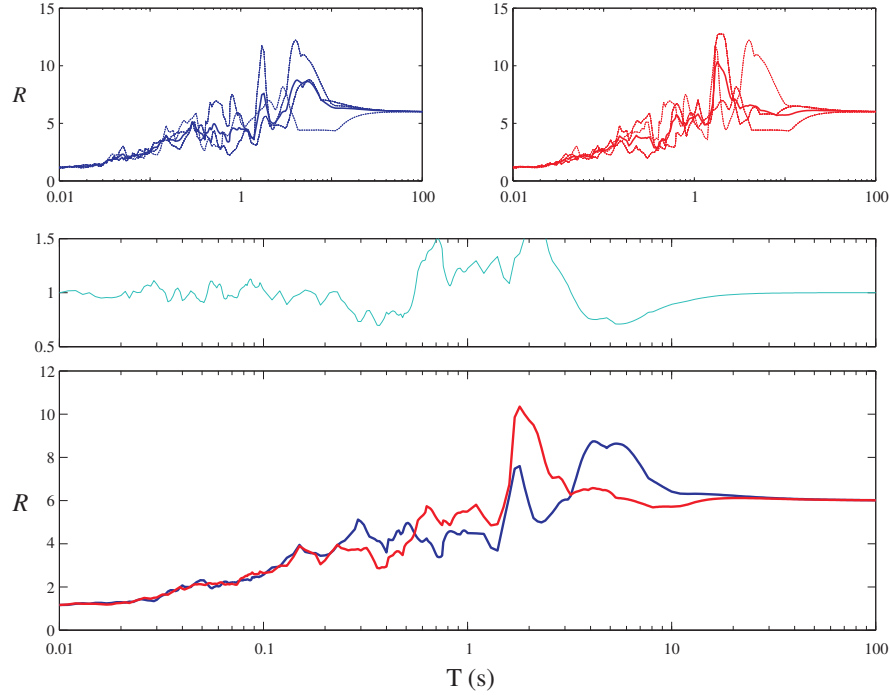


FIG. 5.9 : R - μ - T des données synthétiques brutes pour la famille 2 de l'Ouest avec $\mu = 6$. Légende : bleu = composante x ; rouge = composante y ; cyan = ν_{xy}

On remarque que les résultats des données synthétiques diffèrent quelque peu des résultats historiques. Tout d'abord, les pentes initiales sont plus faibles sur les R - μ - T artificiels ce qui décale vers les grandes périodes le palier oscillant autour de la ductilité. Pour l'Ouest, les différences sont assez faibles cependant la "bosse" postérieure au palier oscillant est plus petite pour les données synthétiques. À l'Est, par contre, les différences sont flagrantes. "L'effet de trou" est très faible et apparaît pour des plus grandes périodes sur les R - μ - T artificiels. De plus, la pente initiale des R - μ - T synthétiques est très inférieure à celle observée pour les données historiques. Les figures 5.11 et 5.12 illustrent la différence entre les R - μ - T moyens de l'Est et de l'Ouest s'ils sont calculés à partir de données historiques ou synthétiques.

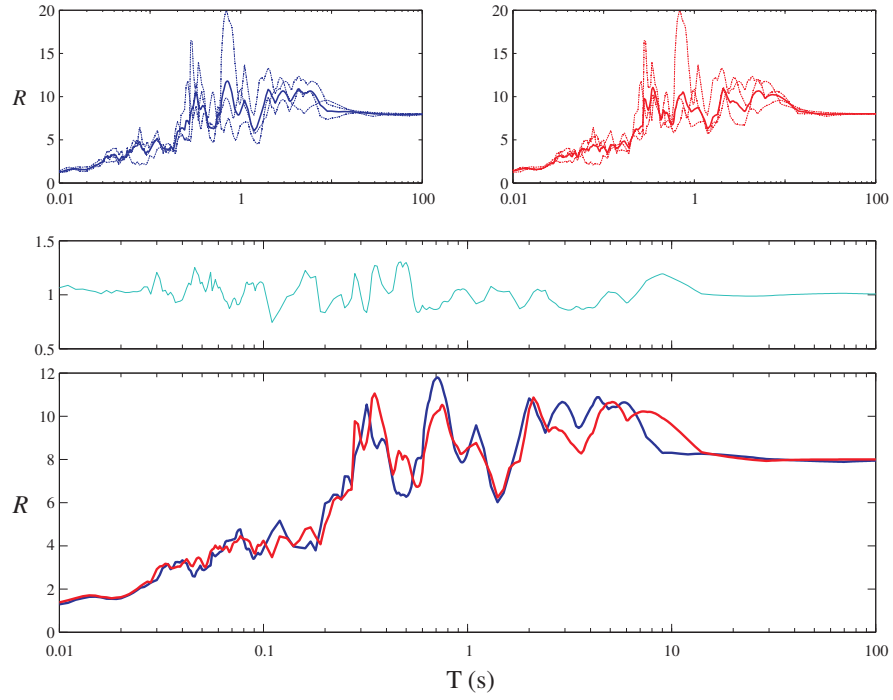


FIG. 5.10 : R - μ - T des données synthétiques brutes pour la famille 1 de l'Est avec $\mu = 8$.
 Légende : *bleu* = composante x ; *rouge* = composante y ; *cyan* = ν_{xy}

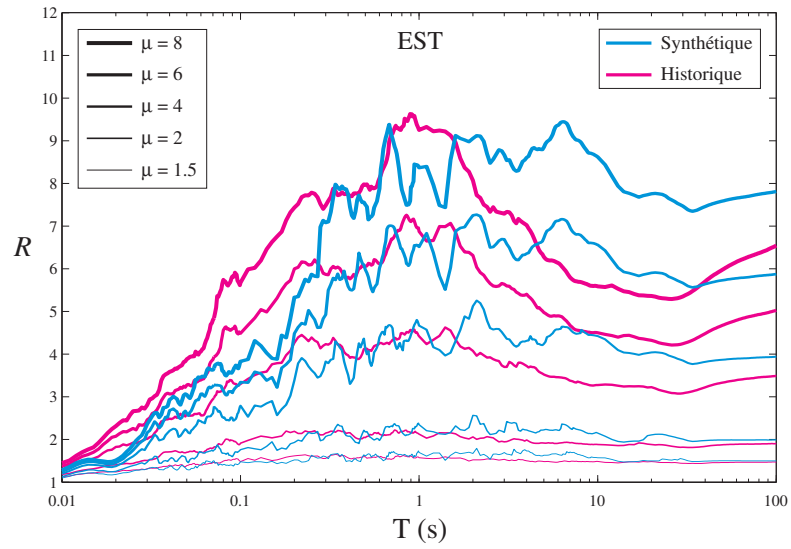


FIG. 5.11 : Comparaison des R - μ - T moyens historiques et synthétiques bruts de l'Est.
 Légende : *cyan* = synthétique ; *magenta* = historique

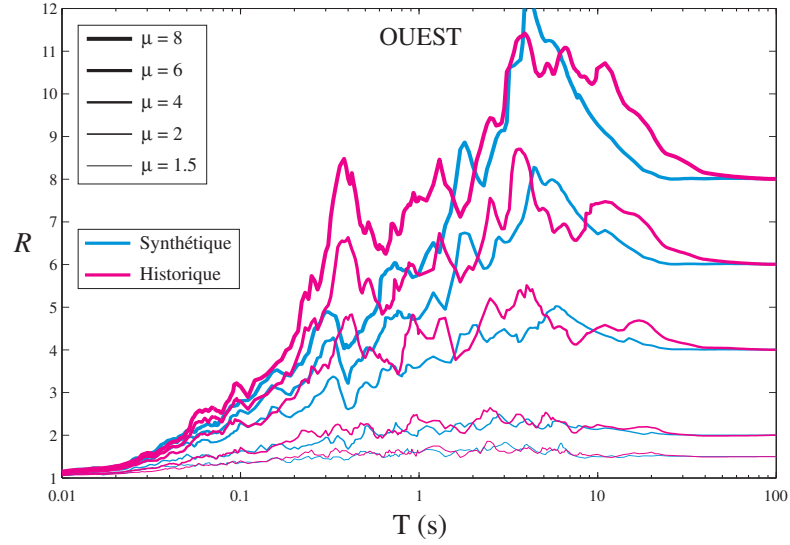


FIG. 5.12 : Comparaison des R - μ - T moyens historiques et synthétiques bruts de l'Ouest. *Légende : cyan = synthétique ; magenta = historique*

On présente enfin, à la figure 5.13, la même illustration qu'au paragraphe 5.3.1 comparant les R - μ - T moyens de l'Est et de l'Ouest pour les données synthétiques.

En conclusion, les résultats des R - μ - T synthétiques varient de ceux calculés avec des données historiques. Ces graphiques synthétiques sous-estiment la pente initiale, la "bosse" post-palier oscillant et "l'effet de trou". C'est pour l'Est que ces différences sont les plus importantes.

5.4.2 Les données synthétiques décorrélées

À présent, on souhaite illustrer l'effet de la décorrélation sur les R - μ - T artificiels. Comme précédemment, on notera ces graphiques \bar{R} - μ - T . On définit toujours ν_H (équation (5.8)) comme étant le rapport entre les \bar{R} - μ - T des directions majeure et mineure horizontales. On moyenne aussi les \bar{R} - μ - T d'une même famille pour donner des \bar{R} - μ - T moyens. On présente sur les figures 5.14 et 5.15 les \bar{R} - μ - T des mêmes familles qu'au paragraphe 5.4.1.

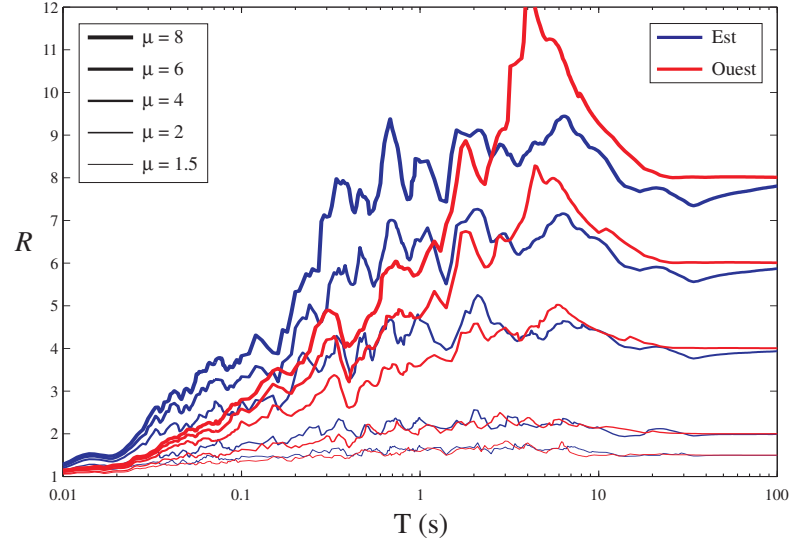


FIG. 5.13 : R - μ - T moyens des données synthétiques brutes pour l'Est et pour l'Ouest. Légende : bleu = R - μ - T moyen de l'Est; rouge = R - μ - T moyen de l'Ouest

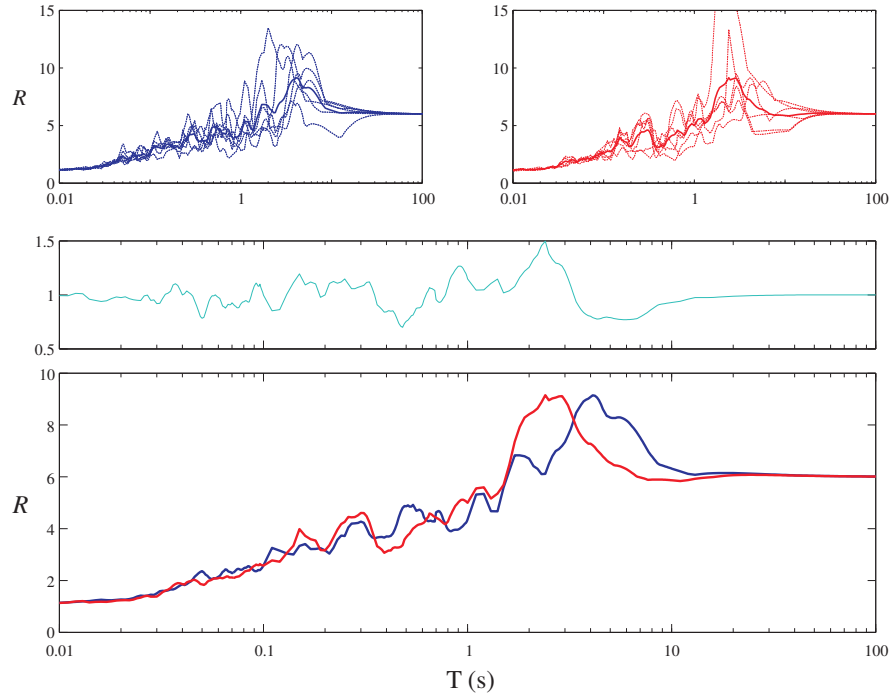


FIG. 5.14 : \bar{R} - μ - T des données synthétiques décorréliées pour la famille 2 de l'Ouest avec $\mu = 6$. Légende : bleu = composante majeure; rouge = composante mineure; cyan = ν_H

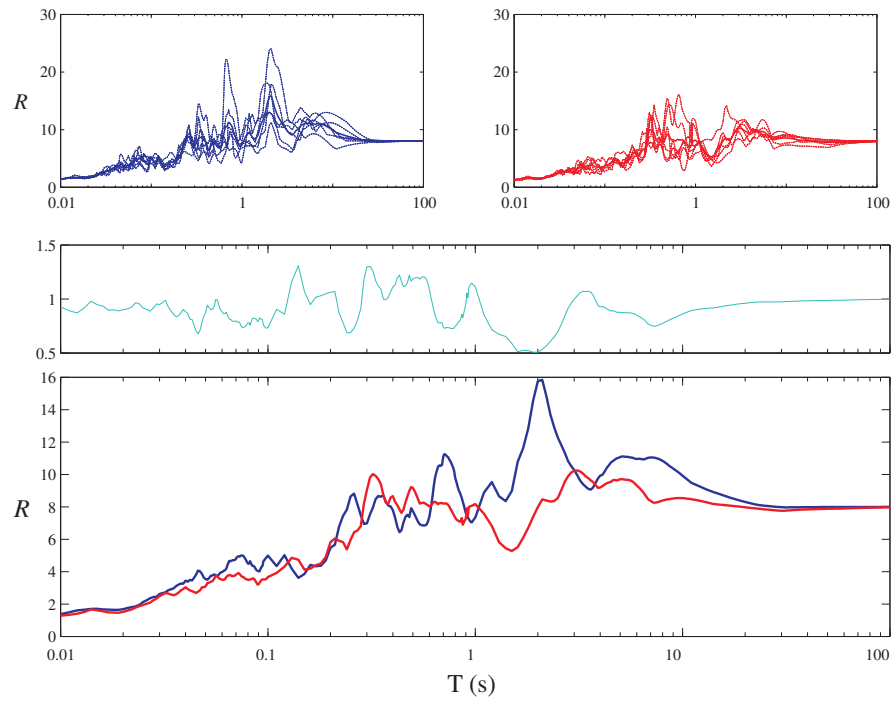


FIG. 5.15 : \overline{R} - μ - T des données synthétiques décorrélées pour la famille 1 de l'Est avec $\mu = 8$. Légende : bleu = composante majeure ; rouge = composante mineure ; cyan = ν_H

On note, là encore, peu de différences à première vue. On utilise alors la distance Λ définie à l'équation (5.10) pour quantifier l'écart entre les $R-\mu-T$ et $\bar{R}-\mu-T$ synthétiques. Le tableau 5.2 présente les valeurs de Λ pour chaque groupement de séismes artificiels de l'Est et de l'Ouest. On remarque que l'effet de la décorrélation sur les $R-\mu-T$ synthétiques est moins prononcé que sur ceux historiques. La valeur de Λ maximale étant seulement 6% (au lieu de 20%). L'effet maximal a lieu sur les $R-\mu-T$ moyens de la famille 4 de l'Est. On illustre cet exemple à la figure 5.16. Une fois de plus les variations apparaissent pour des périodes élevées tendant à réduire "l'effet de trou". Cette fois-ci les effets sont du même ordre de grandeur à l'Est et à l'Ouest.

En résumé, on notera que la décorrélation a les mêmes effets sur les $R-\mu-T$ historiques et synthétiques (Effet croissant avec la ductilité et amenuisement de "l'effet de trou") à l'exception de l'importance spécifique du phénomène à l'Est. En effet, pour les données synthétiques l'effet de la décorrélation est du même ordre de grandeur à l'Est et à l'Ouest.

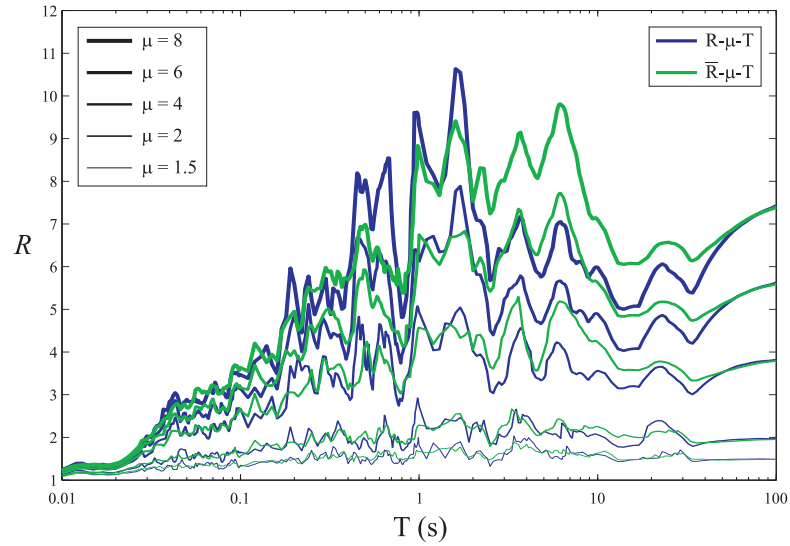


FIG. 5.16 : $R-\mu-T$ et $\bar{R}-\mu-T$ des données synthétiques de la famille 4 de l'Est. *Légende : bleu = $R-\mu-T$; vert = $\bar{R}-\mu-T$*

Tableau 5.2 Distance Λ entre les graphiques $R\text{-}\mu\text{-}T$ brut et décorrélé synthétiques.

(M, R)	$\Lambda^{1.5}$	Λ^2	Λ^4	Λ^6	Λ^8
Est M = 6 $R_e = 30$	0.0078	0.0121	0.0125	0.0111	0.0101
Est M = 6 $R_e = 50$	0.0114	0.0175	0.0167	0.0158	0.0193
Est M = 7 $R_e = 20$	0.0194	0.0238	0.0289	0.0308	0.0321
Est M = 7 $R_e = 70$	0.0186	0.0355	0.0503	0.0604	0.0678
Ouest M = 6.5 $R_e = 30$	0.0104	0.0166	0.0305	0.0302	0.0277
Ouest M = 6.5 $R_e = 50$	0.0061	0.0070	0.0066	0.0090	0.0124
Ouest M = 7.5 $R_e = 70$	0.0113	0.0170	0.0190	0.0205	0.0211

5.5 Étude sur les formules empiriques

5.5.1 Comparaison avec les formules de la littérature

À présent, nous souhaitons comparer nos résultats expérimentaux des données historiques et artificielles de 1999 avec les formules empiriques de Nassar et Krawinkler 1991 et Miranda 1993. Les hypothèses de comparaison sont les suivantes :

- Pour l'utilisation de la formule de Nassar et Krawinkler 1991, on précise que la rigidité post-élastique de notre étude est nulle (*idest.* $\alpha = 0$)
- Pour l'utilisation de la formule de Miranda 1993, on fait l'hypothèse de profilé de sol de type C. On utilisera la formule développée pour les sites sur alluvions.

On obtient ainsi les deux formules suivantes :

$$R_{Nassar}^{(\mu)}(T) = [c(T)(\mu - 1) + 1] \frac{1}{c(T)} \quad \text{avec} \quad c(T) = \frac{T}{1+T} + \frac{0.42}{T} \quad (5.11)$$

$$R_{Miranda}^{(\mu)}(T) = \frac{\mu - 1}{\Phi} + 1 \quad (5.12)$$

$$\text{avec} \quad \Phi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} \exp \left[-2 \left(\ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right] \quad (5.13)$$

On remarquera que les formules proposées dans la littérature ne prennent pas comme paramètre la géographie (Est ou Ouest). Les figures 5.17, 5.18, 5.19 et 5.20 présentent les R - μ - T moyens calculés à partir de notre base de données et les deux formules empiriques de la littérature.

On remarque que pour les données historiques, les formules empiriques sont de mauvaise qualité. À l'Est, les courbes réelles sont décalées vers les petites périodes et l'effet de trou est beaucoup plus important que celui prédit par la formule de Miranda 1993. À l'Ouest, les formules empiriques se rapprochent plus des R - μ - T calculés mais ne prennent pas correctement en compte la bosse post palier de ductilité. En ce qui concerne les données synthétiques, les écarts entre formules empiriques et données réelles sont moindres. Pour

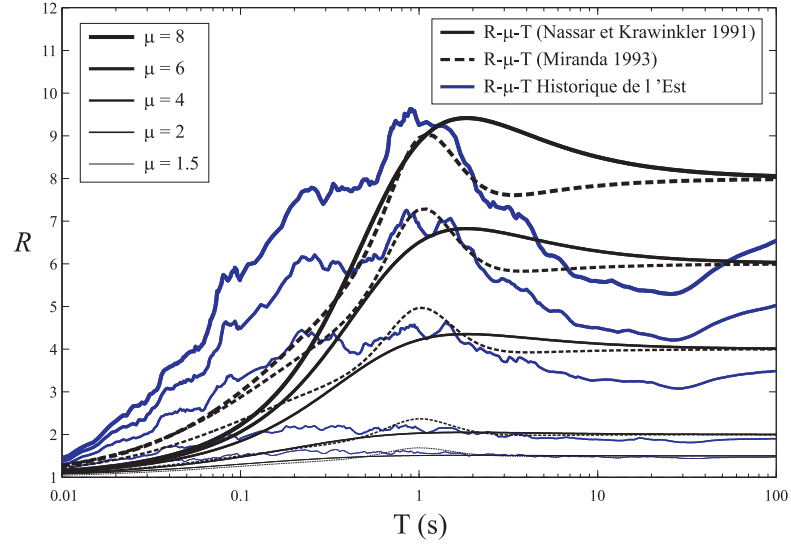


FIG. 5.17 : R - μ - T moyens des données historiques de l'Est comparés avec les formules empiriques de la littérature. *Légende : bleu = R - μ - T moyens; ligne noire = Formule empirique de Nassar; tirés noirs = Formule empirique de Miranda*

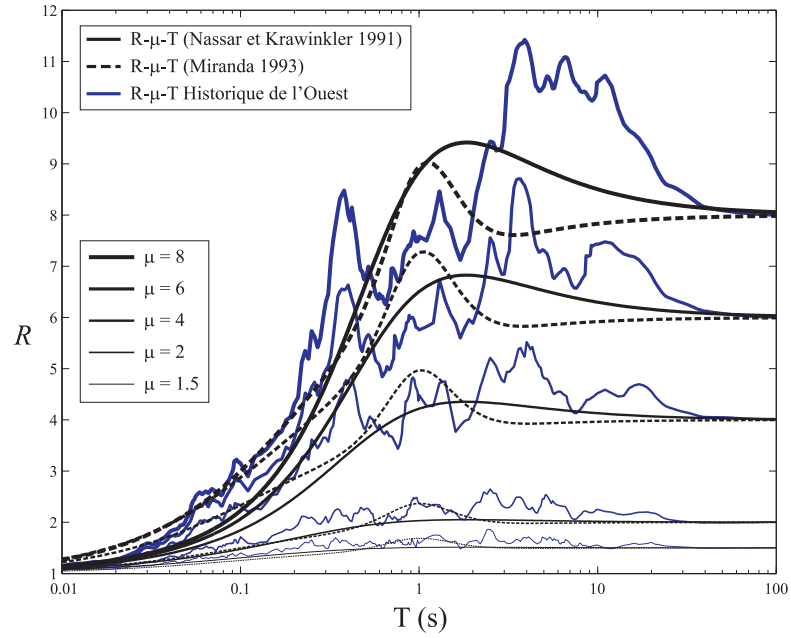


FIG. 5.18 : R - μ - T moyens des données historiques de l'Ouest comparés avec les formules empiriques de la littérature. *Légende : bleu = R - μ - T moyens; ligne noire = Formule empirique de Nassar; tirés noirs = Formule empirique de Miranda*

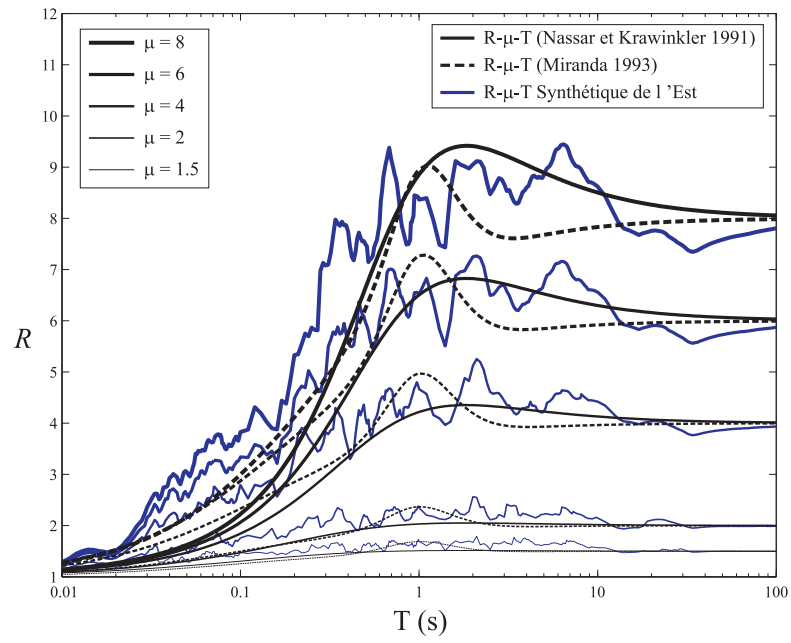


FIG. 5.19 : R - μ - T moyens des données synthétiques de l'Est comparés avec les formules empiriques de la littérature. *Légende : bleu = R - μ - T moyens; ligne noire = Formule empirique de Nassar; tirés noirs = Formule empirique de Miranda*

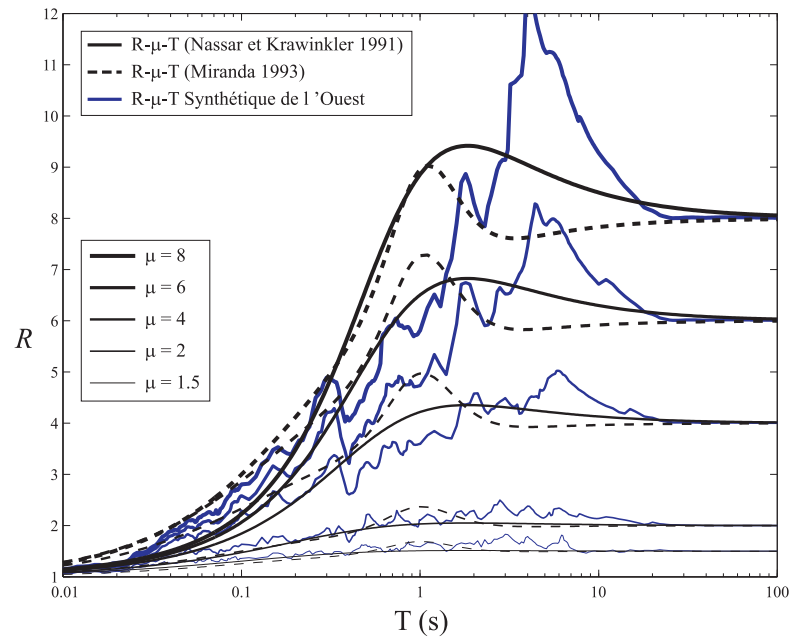


FIG. 5.20 : R - μ - T moyens des données synthétiques de l'Est comparés avec les formules empiriques de la littérature. *Légende : bleu = R - μ - T moyens; ligne noire = Formule empirique de Nassar; tirés noirs = Formule empirique de Miranda*

l'Est, la formule de Miranda 1993 est meilleure pour les périodes inférieures à 1 seconde alors que la formule de Nassar et Krawinkler 1991 prend mieux en compte la variation de R pour les grandes périodes. Pour les données de l'Ouest, les formules semblent être décalées vers les petites périodes et n'illustrent pas bien la bosse post palier de ductilité.

Vu ces résultats peu satisfaisants, on souhaite élaborer une formule empirique prenant en compte la caractéristique géographique de la secousse sismique dans un premier temps, puis l'effet du sol et la rigidité post-élastique. On développera ainsi 2 séries de formules, l'une pour l'Est et l'autre pour l'Ouest. Ces formules ayant la même forme seront calibrées à la fois sur les données moyennes historiques et synthétiques (1999 et 2009).

5.5.2 Développement d'une nouvelle formule

5.5.2.1 Caractérisation géographique

En prenant bien en compte les conditions aux limites en μ et en T , on propose une formule simple de la forme :

$$R^{(\mu)}(T) = f(\mu - 1) + 1 \quad (5.14)$$

avec $f = f(\mu, T)$ une fonction vérifiant les conditions aux frontières suivantes :

$$\lim_{T \rightarrow 0} f(\mu, T) = 0 \quad (5.15)$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} f(\mu, T) = 1 \quad (5.16)$$

Pour $\mu = 1$ (*idest.* pour un système élastique), on obtient bien un facteur de réduction de force R constant valant 1 pour tout T . Il n'y a pas de réduction de force pour un système élastique. Pour $T = 0$, on obtient aussi $R = 1$ car pour des systèmes infiniment rigides la force inélastique est sensiblement la même que celle élastique. Enfin pour $T = \infty$, on se trouve dans l'hypothèse des déplacements égaux et l'on obtient bien $R = \mu$.

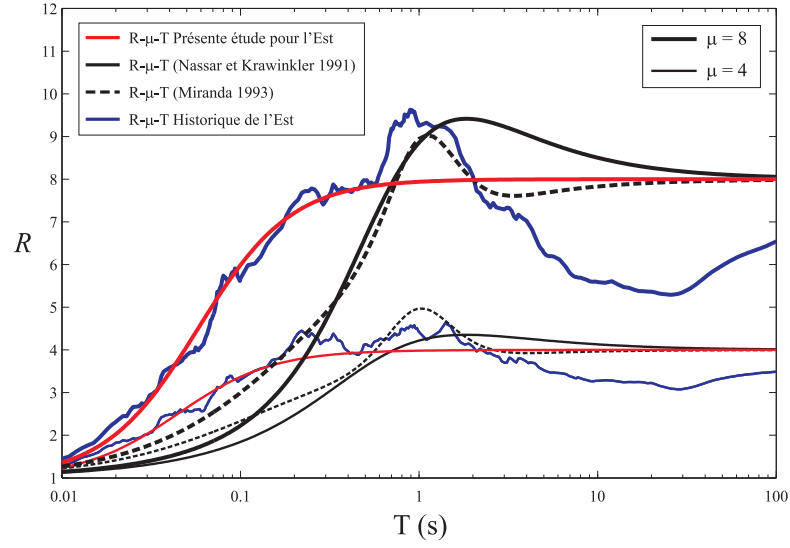


FIG. 5.21 : Première formule empirique basée sur les données historiques de l'Est pour $\mu = 4$ et 8. *Légende : bleu = R - μ - T moyens ; ligne rouge = Formule empirique 1 de ce mémoire ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda*

On propose la forme suivante pour $f(\mu, T)$:

$$f(\mu, T) = \frac{10^{\kappa(\mu, T)}}{1 + 10^{\kappa(\mu, T)}} \quad \text{avec} \quad \kappa(\mu, T) = p(\mu) \log_{10}(T) + q(\mu) \quad (5.17)$$

p et q sont des fonctions d'interpolation permettant de minimiser l'écart entre la formule empirique et le graphique R - μ - T moyen des données historiques ou synthétiques. Pour la formule basée sur les données historiques, on trouve :

$$\begin{aligned} \text{Pour l'Est :} \quad p(\mu) &= 0.0103\mu^2 - 0.1173\mu + 1.9396 \\ q(\mu) &= e^{-0.705624\mu + 1.023399} + 2.046125 \\ \text{Pour l'Ouest :} \quad p(\mu) &= -0.0029\mu^2 - 0.0101\mu + 1.7119 \\ q(\mu) &= 0.0152\mu^2 - 0.3062\mu + 2.6005 \end{aligned} \quad (5.18)$$

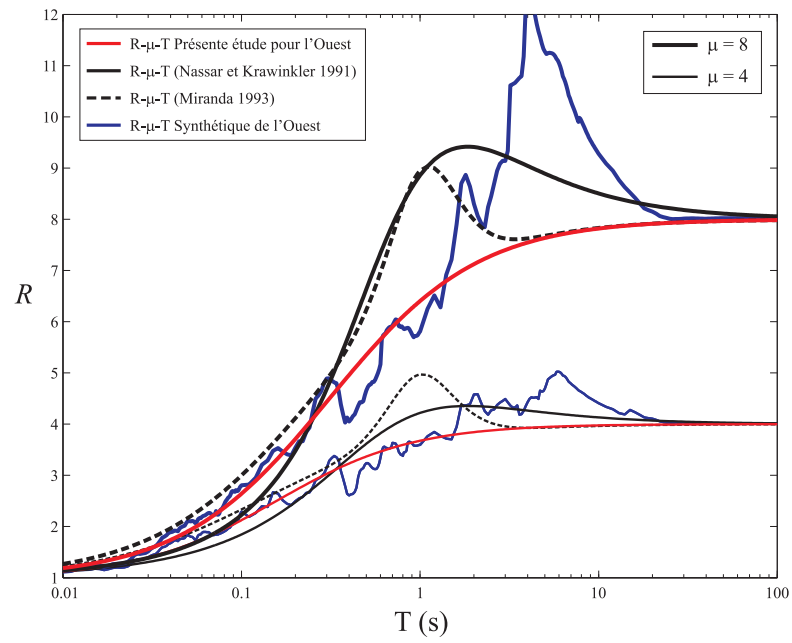


FIG. 5.22 : Première formule empirique simple basée sur les données synthétiques de l'Ouest pour $\mu = 4$ et 8. *Légende : bleu = $R-\mu-T$ moyens ; ligne rouge = Formule empirique 1 de ce mémoire ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda*

Et pour celle basée sur les données synthétiques de 1999 :

$$\begin{aligned}
 \text{Pour l'Est : } \quad p(\mu) &= 1.445 \\
 q(\mu) &= e^{-0.596\mu+0.762} + 1.463 \\
 \text{Pour l'Ouest : } \quad p(\mu) &= 0.0133\mu^2 - 0.1831\mu + 1.6568 \\
 q(\mu) &= 2.7324\mu^{-0.789}
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

On visualise sur les figures 5.21 et 5.22 quelques exemples de notre première formule empirique pour $\mu = 4$ et 8. On remarque que "l'effet de trou" et la bosse post palier de ductilité ne sont pas modélisés avec cette première approximation.

Afin de modéliser l'effet de trou et de bosse, on propose une nouvelle formule plus complète :

$$R^{(\mu)}(T) = f(\mu - 1) + 1 + P(\mu, T) + H(\mu, T) \tag{5.20}$$

FIG. 5.23 : Principe de calcul de la formule.

avec toujours la même définition et les mêmes paramètres pour $f(\mu, T)$ et deux fonctions de Gauss P et H représentant respectivement l'effet de bosse (P pour "Peak" en anglais) et l'effet de trou (H pour "Hole" en anglais). Ces fonctions de Gauss sont définies par :

$$P(\mu, T) = a_1(\mu)e^{-a_2(\mu)(\log_{10}(T)+a_3(\mu))^2} \tag{5.21}$$

$$H(\mu, T) = b_1(\mu)e^{-b_2(\mu)(\log_{10}(T)+b_3(\mu))^2} \tag{5.22}$$

où les $a_i(\mu)$ et $b_i(\mu)$ sont des fonctions d'interpolation dépendant uniquement de la ductilité μ . Ces dernières fonctions ont quelques restrictions pour respecter la condition limite

$\mu = 1$:

$$a_1(1) = 0 \quad (5.23)$$

$$b_1(1) = 0 \quad (5.24)$$

$$a_1(\mu) \geq 0 \quad (5.25)$$

$$b_1(\mu) \leq 0 \quad (5.26)$$

$$a_2(\mu) \geq 0 \quad (5.27)$$

$$b_2(\mu) \geq 0 \quad (5.28)$$

Pour la formule basée sur les données historiques, ces paramètres valent :

$$\begin{aligned} \text{Pour l'Est : } \quad a_1(\mu) &= 0.02(\mu - 1)(\mu + 7.368) \\ a_2(\mu) &= 19.034 \log_{10}(\mu) \\ a_3(\mu) &= \frac{0.626}{\mu - 0.126} \\ b_1(\mu) &= -0.026(\mu - 1)(\mu + 6.979) \\ b_2(\mu) &= 1.46 \\ b_3(\mu) &= -1.346 \end{aligned} \quad (5.29)$$

$$\begin{aligned} \text{Pour l'Ouest : } \quad a_1(\mu) &= 0.032(\mu - 1)(\mu + 4.295) \\ a_2(\mu) &= 2.139 \log_{10}(\mu - 0.931) + 2.488 \\ a_3(\mu) &= -0.557 \log_{10}(\mu - 0.741) - 0.328 \\ b_1(\mu) &= 0 \\ b_2(\mu) &= 0 \\ b_3(\mu) &= 0 \end{aligned}$$

Et pour celle basée sur les données synthétiques de 1999, on trouve :

$$\begin{aligned}
 \text{Pour l'Est : } \quad a_1(\mu) &= 1.2 \log_{10}(\mu) \\
 a_2(\mu) &= 1.46 \\
 a_3(\mu) &= -0.067\mu - 0.264 \\
 b_1(\mu) &= -0.01(\mu - 1)(\mu + 6.768) \\
 b_2(\mu) &= -0.25\mu + 6.4 \\
 b_3(\mu) &= -1.457 \\
 \\
 \text{Pour l'Ouest : } \quad a_1(\mu) &= 0.043(\mu - 1)(\mu + 4.268) \\
 a_2(\mu) &= 4.718\sqrt{\mu - 1} \\
 a_3(\mu) &= 0.021\mu^2 - 0.242\mu - 0.07 \\
 b_1(\mu) &= 0 \\
 b_2(\mu) &= 0 \\
 b_3(\mu) &= 0
 \end{aligned} \tag{5.30}$$

On présente la formule améliorée sur les figures 5.24, 5.25, 5.26 et 5.27. On remarque que cette dernière formule épouse de façon très satisfaisante les graphiques R - μ - T moyens aussi bien de l'Est que de l'Ouest. On montre ainsi que deux formules, l'une pour l'Est et l'une pour l'Ouest, permettent de mieux appréhender les variations du facteur de réduction de force. On complète cette étude au prochain paragraphe en y ajoutant l'effet du sol et la rigidité post-élastique.

5.5.2.2 Effet du sol, de la rigidité post-élastique et de la magnitude

On souhaite, à présent, élargir notre formule afin qu'elle intègre les paramètres de type du sol, de rigidité post-élastique et la magnitude. On utilisera pour la calibration de cette formule les données artificielles d'Atkinson de 2009 (voir paragraphe 2.4.4.2) et on la nommera "formule empirique 2009" par souci de simplification. On présente une partie des R - μ - T moyens calculés aux figures 5.28, 5.29, 5.30 et 5.31.

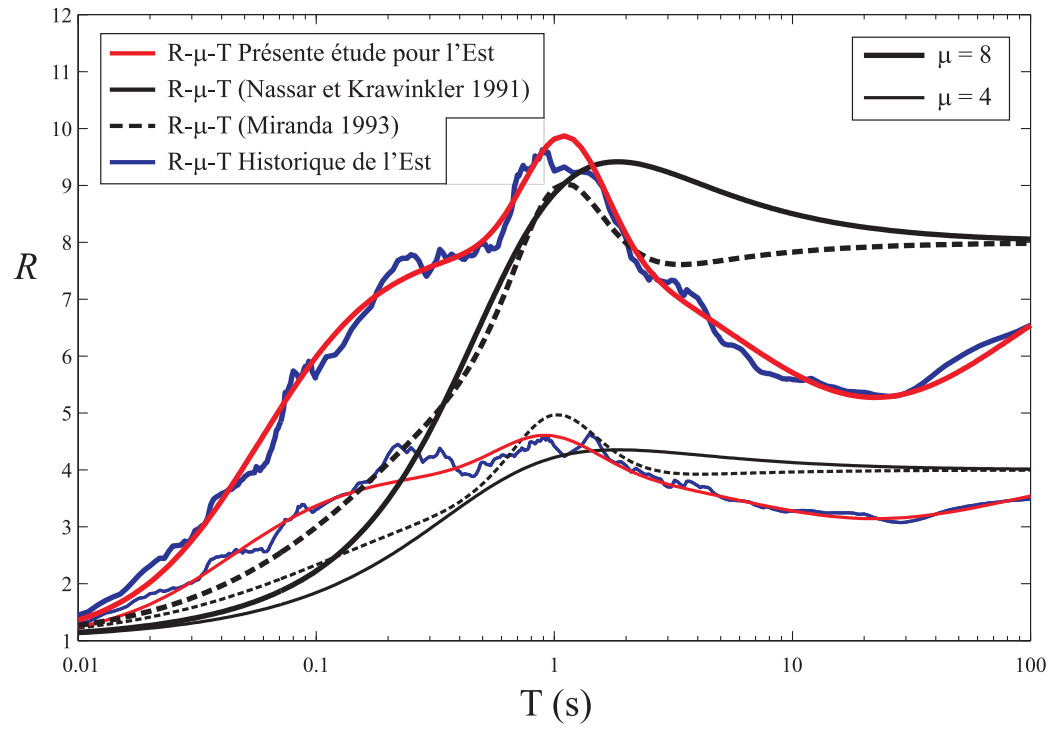


FIG. 5.24 : Formule empirique finale basée sur les données historiques de l'Est pour $\mu = 4$ et 8. *Légende : bleu = R - μ - T moyens; ligne rouge = Formule empirique 2 de ce mémoire; ligne noire = Formule empirique de Nassar; tirés noirs = Formule empirique de Miranda*

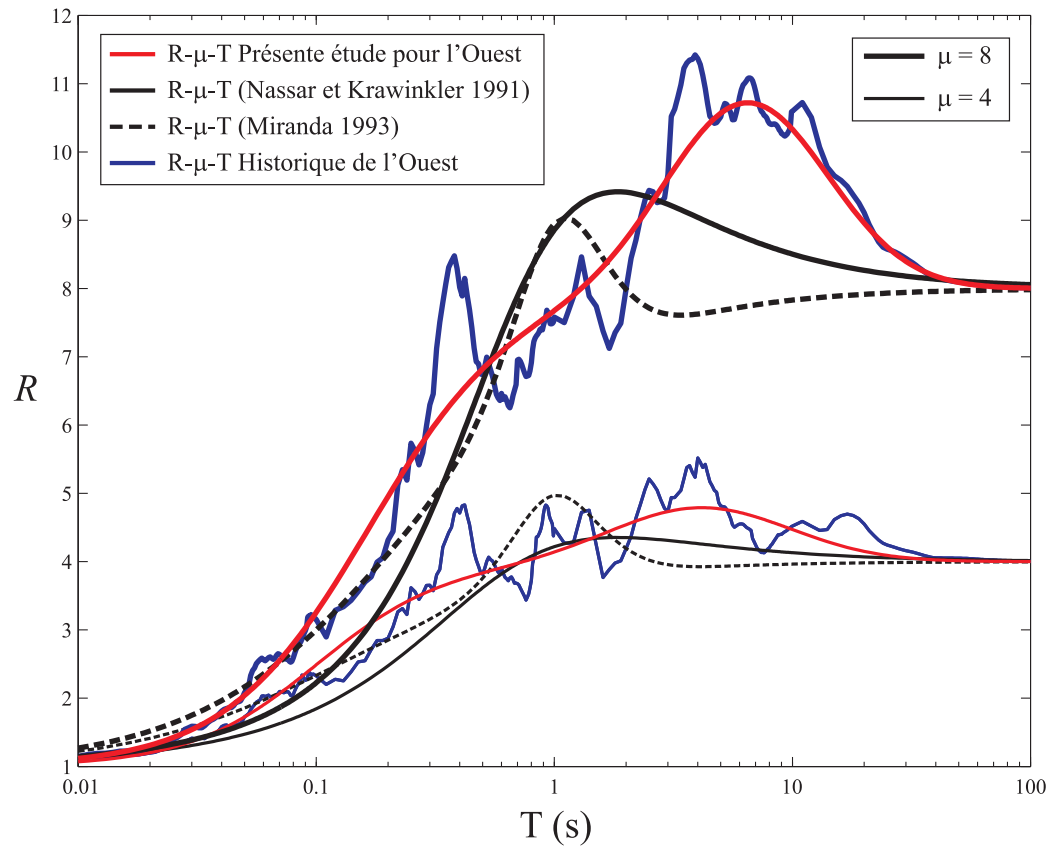


FIG. 5.25 : Formule empirique finale basée sur les données historiques de l'Ouest pour $\mu = 4$ et 8. *Légende : bleu = R - μ - T moyens ; ligne rouge = Formule empirique 2 de ce mémoire ; ligne noire = Formule empirique de Nassar ; tirés noirs = Formule empirique de Miranda*

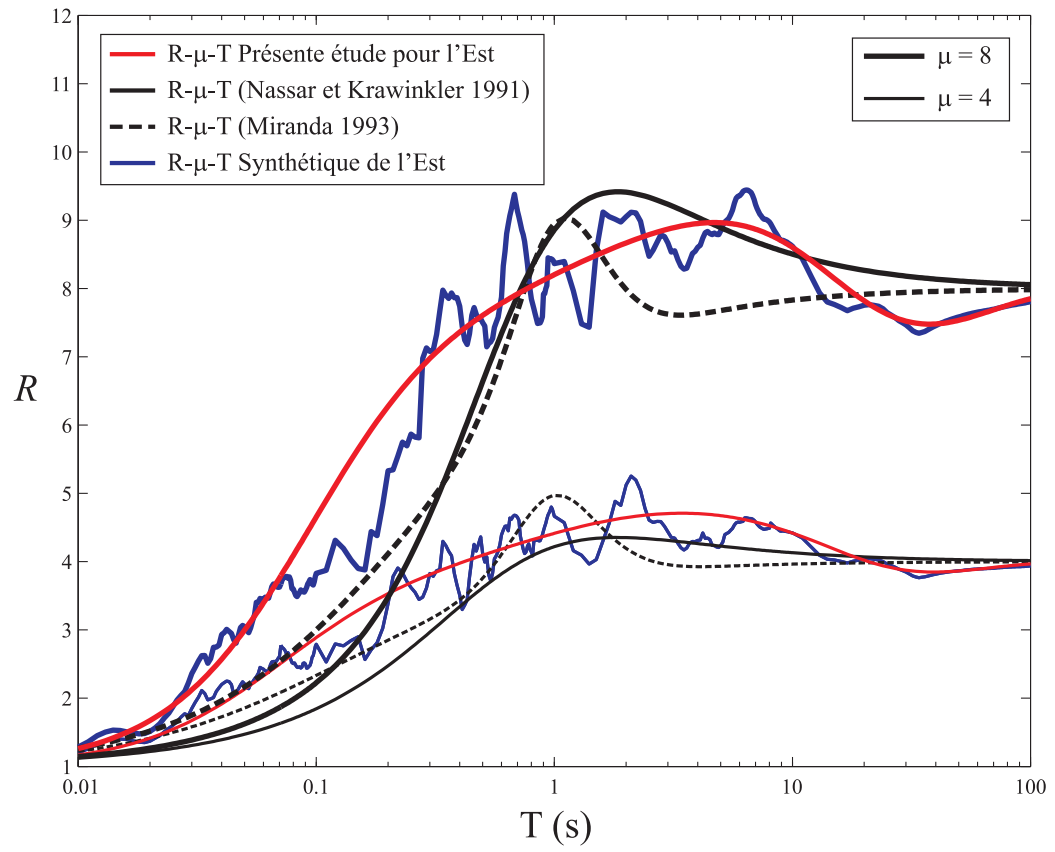


FIG. 5.26 : Formule empirique finale basée sur les données synthétiques de l'Est pour $\mu = 4$ et 8. *Légende : bleu = $R-\mu-T$ moyens; ligne rouge = Formule empirique 2 de ce mémoire; ligne noire = Formule empirique de Nassar; tirés noirs = Formule empirique de Miranda*

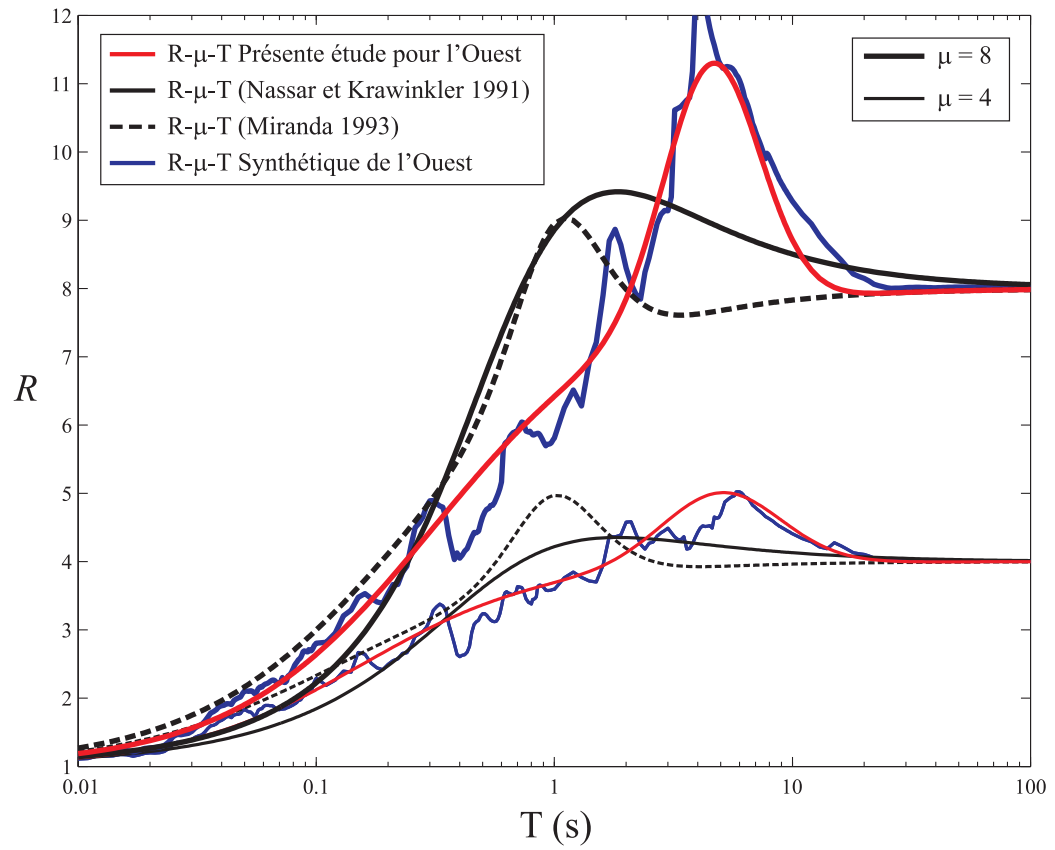


FIG. 5.27 : Formule empirique finale basée sur les données synthétiques de l'Ouest pour $\mu = 4$ et 8. *Légende : bleu = R - μ - T moyens; ligne rouge = Formule empirique 2 de ce mémoire; ligne noire = Formule empirique de Nassar; tirés noirs = Formule empirique de Miranda*

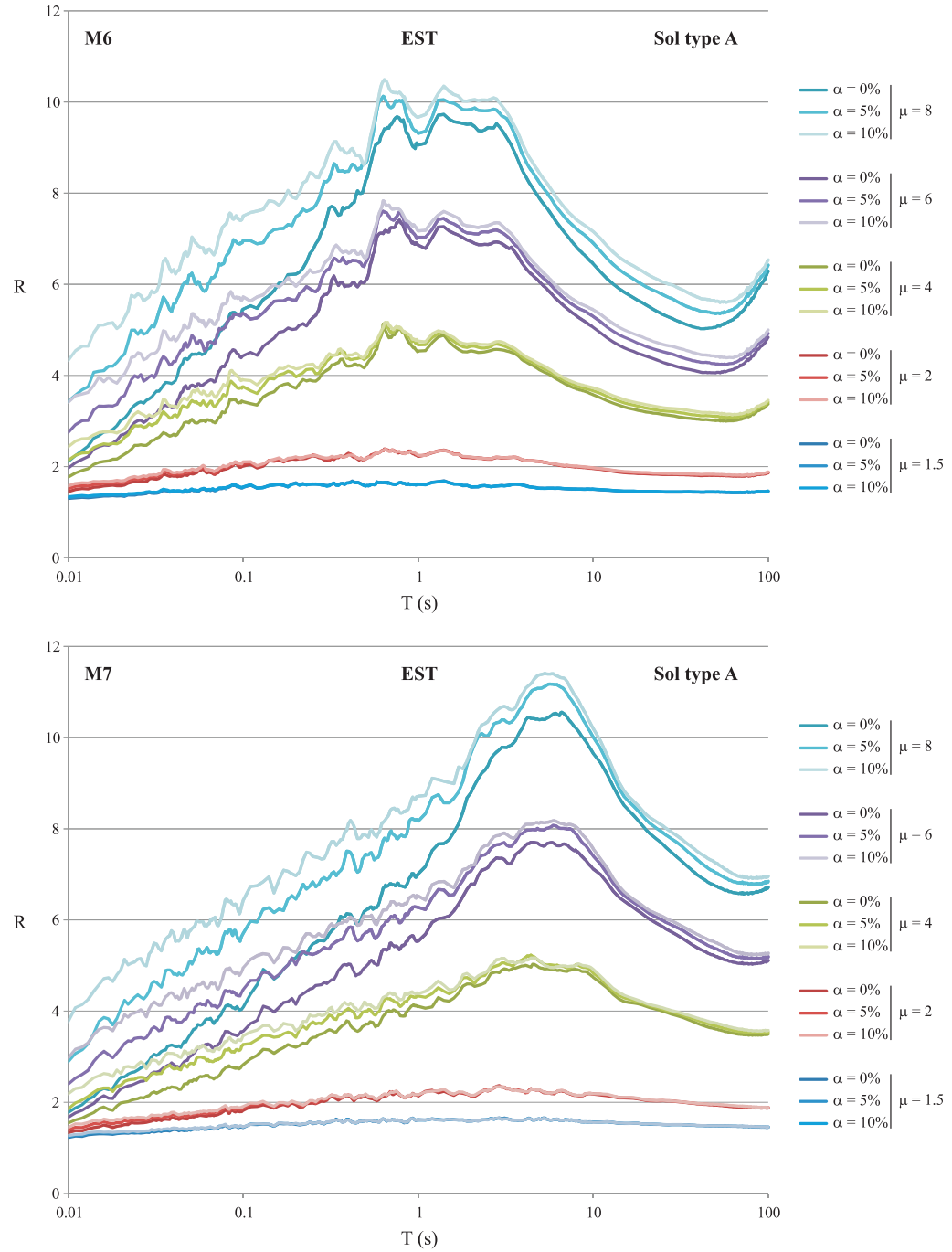


FIG. 5.28 : R - μ - T moyens des données synthétiques de 2009 pour l'Est et un sol de type A

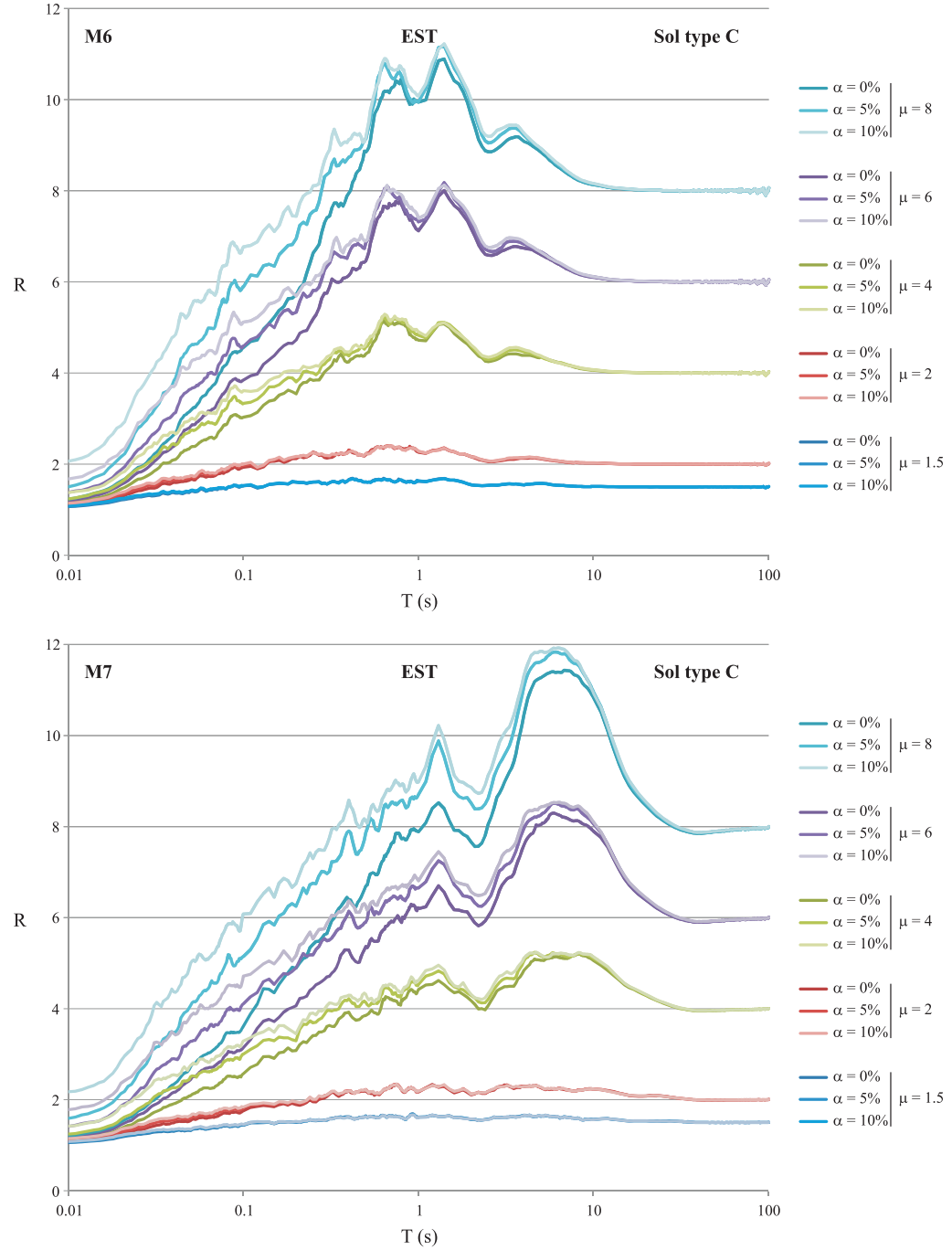


FIG. 5.29 : R - μ - T moyens des données synthétiques de 2009 pour l'Est et un sol de type C

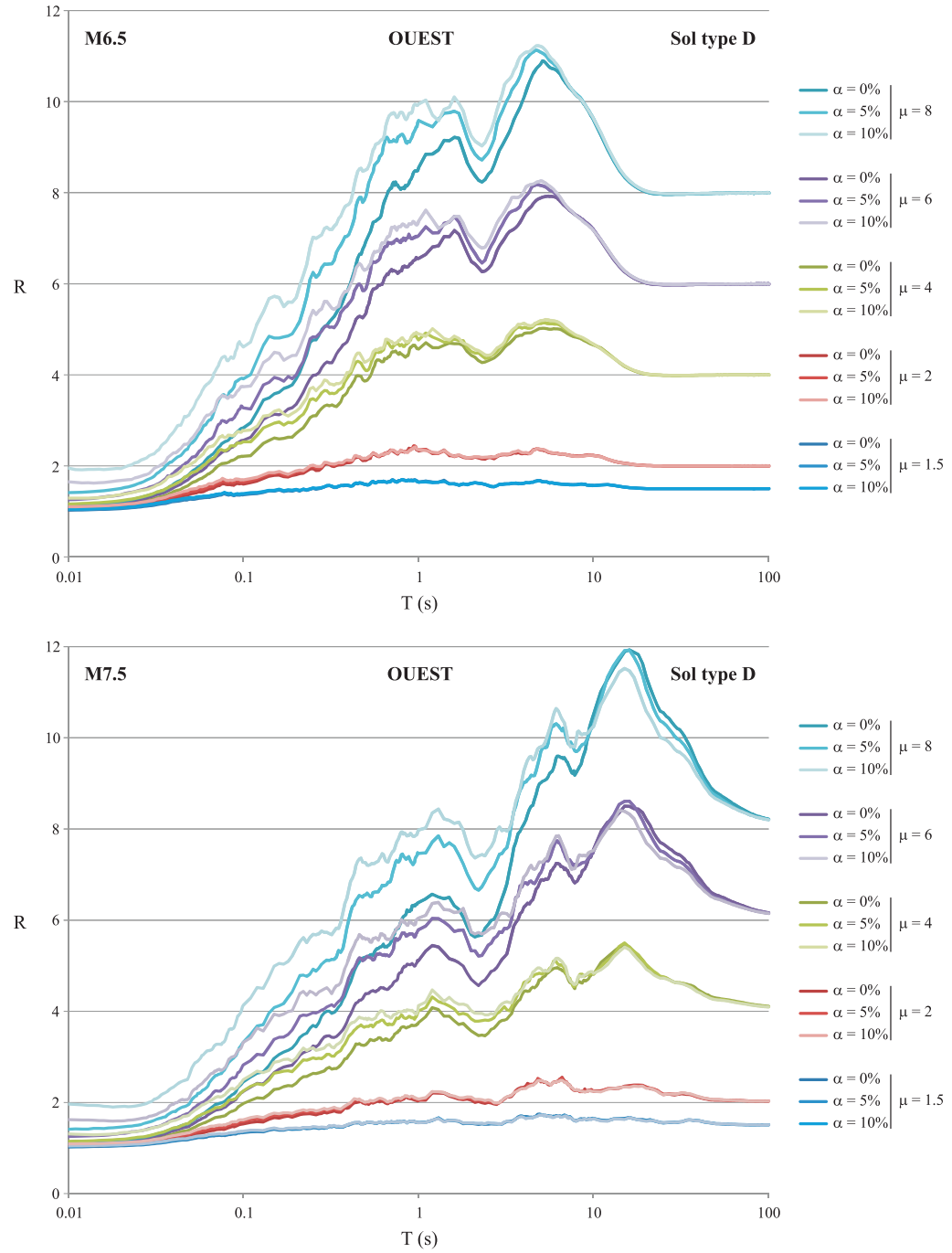


FIG. 5.30 : R - μ - T moyens des données synthétiques de 2009 pour l'Ouest et un sol de type D

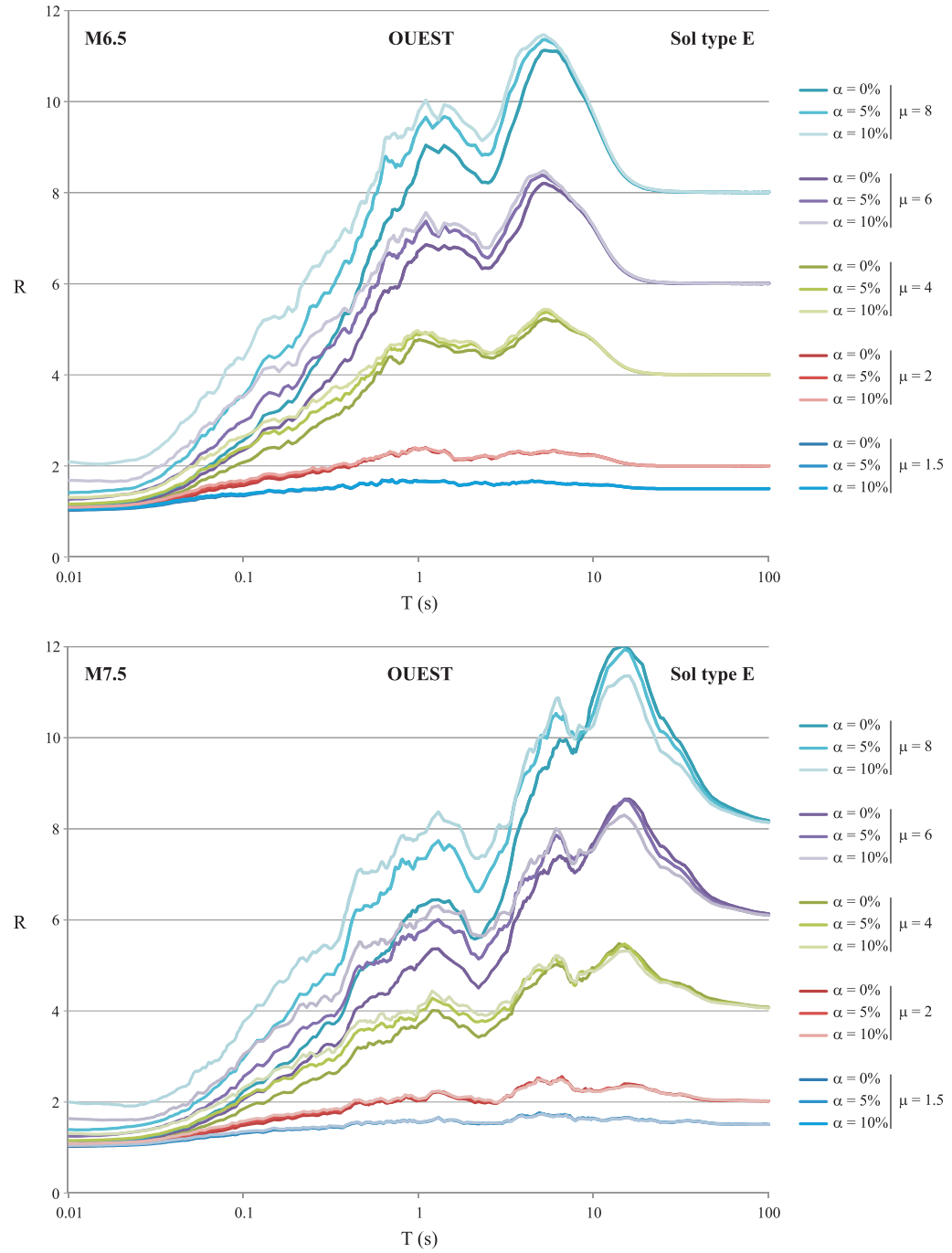


FIG. 5.31 : R - μ - T moyens des données synthétiques de 2009 pour l'Ouest et un sol de type E

On remarque que la rigidité post-élastique a tendance à augmenter R pour les périodes inférieures à 3 s. "L'effet de trou" apparaît uniquement pour les données de l'Est pour un sol de type A (roc dur). Ces derniers profilés de sol présentent des facteurs R très différents des autres sols. Les R - μ - T pour les sols de type D et E sont très semblables. Enfin, on note une grande influence de la magnitude sur les données synthétiques 2009.

On va, à présent, détailler la formulation de l'équation empirique intégrant l'effet du sol, la rigidité post-élastique, la magnitude et la géographie. Par soucis de clarté et afin d'alléger les notations, les variables de fonctions ne seront présentes que dans le membre gauche d'une équation et les fonctions seront écrites en gras.

On utilisera les variables suivantes :

- μ : la ductilité variant de 1 à 8 dans ce mémoire
- α : la rigidité post-élastique (en % de la rigidité initiale) variant de 0 à 10%
- M_w : la magnitude du moment sismique valant 6 ou 7 pour l'Est ou 6.5 ou 7.5 pour l'Ouest
- S : le profilé de sol (type A, C, D ou E)
- G : la variable représentant la géographie (Est ou Ouest)

La formulation générale reste identique, soit :

$$\mathbf{R}(\mu, T, \alpha, M_w, S, G) = \mathbf{f}(\mu - 1) + 1 + \mathbf{P} + \mathbf{H} \quad (5.31)$$

La fonction \mathbf{f} s'exprime par :

$$\mathbf{f}(\mu, T, \alpha, M_w, S, G) = \frac{10^{(\mathbf{p} \log_{10}(T) + \mathbf{q})}}{1 + 10^{(\mathbf{p} \log_{10}(T) + \mathbf{q})}} \quad (5.32)$$

\mathbf{p} et \mathbf{q} étant des fonctions d'interpolation à plusieurs variables :

$$\mathbf{p}(\mu, \alpha, M_w, S, G) = \mathbf{p}_1 \mu^{\mathbf{p}_2} \quad (5.33)$$

$$\mathbf{q}(\mu, \alpha, M_w, S, G) = \mathbf{q}_1 \mu^{\mathbf{q}_2} \quad (5.34)$$

et

$$\mathbf{p}_1(M_w, S, G) = \mathbf{p}_{11}M_w + \mathbf{p}_{12} \quad (5.35)$$

$$\mathbf{p}_2(\alpha, M_w, S, G) = (\mathbf{p}_{21}M_w + \mathbf{p}_{22})\alpha + \mathbf{p}_{23}M_w + \mathbf{p}_{24} \quad (5.36)$$

$$\mathbf{q}_1(M_w, S, G) = \mathbf{q}_{11}M_w + \mathbf{q}_{12} \quad (5.37)$$

$$\mathbf{q}_2(\alpha, M_w, S, G) = (\mathbf{q}_{21}M_w + \mathbf{q}_{22})\alpha + \mathbf{q}_{23}M_w + \mathbf{q}_{24} \quad (5.38)$$

Enfin, les \mathbf{p}_{ij} et \mathbf{q}_{ij} sont des coefficients empiriques dépendants du type de sol (S) et de la géographie (G). Ces coefficients sont présentés dans les tableaux 5.3 et 5.4.

Tableau 5.3 Coefficients \mathbf{p}_{ij} de la formule empirique 2009.

\mathbf{p}_{ij}	EST				OUEST			
	A	C	D	E	A	C	D	E
\mathbf{p}_{11}	-0.646	-0.530	-0.502	-0.398	-0.222	-0.194	-0.247	-0.280
\mathbf{p}_{12}	5.857	5.487	5.140	4.333	3.225	3.548	3.767	3.925
\mathbf{p}_{21}	0.0000	0.0029	0.0012	0.0038	-0.0044	0.0155	0.0112	0.0205
\mathbf{p}_{22}	0.0085	-0.0203	-0.0107	-0.0295	0.0413	-0.1012	-0.0741	-0.1436
\mathbf{p}_{23}	0.0494	0.0128	0.0417	0.0213	-0.0667	-0.1749	-0.1047	-0.0902
\mathbf{p}_{24}	-0.6026	-0.2483	-0.4217	-0.2596	0.1358	0.9606	0.5321	0.4528

D'autre part, les fonctions gaussiennes \mathbf{P} et \mathbf{H} permettant d'approximer l'effet de bosse et de trou ont pour expression :

$$\mathbf{P}(\mu, T, \alpha, M_w, S, G) = \mathbf{a}_1 e^{-\mathbf{a}_2 (\log_{10}(T) + \mathbf{a}_3)^2} \quad (5.39)$$

$$\mathbf{H}(\mu, T, \alpha, M_w, S, G) = \mathbf{b}_1 e^{-\mathbf{b}_2 (\log_{10}(T) + \mathbf{b}_3)^2} \quad (5.40)$$

En respectant les conditions aux limites des équations 5.23, on approxime les fonctions

Tableau 5.4 Coefficients \mathbf{q}_{ij} de la formule empirique 2009.

\mathbf{q}_{ij}	EST				OUEST			
	A	C	D	E	A	C	D	E
\mathbf{q}_{11}	-1.460	-1.068	-0.980	-0.772	-0.414	-0.359	-0.451	-0.831
\mathbf{q}_{12}	12.966	10.411	9.559	7.975	5.915	5.696	6.079	8.401
\mathbf{q}_{21}	0.0089	0.0105	0.0083	0.0118	0.0212	0.0337	0.0326	0.0425
\mathbf{q}_{22}	-0.0256	-0.0501	-0.0351	-0.0579	-0.1029	-0.1995	-0.1937	-0.2655
\mathbf{q}_{23}	-0.0595	-0.0509	-0.0372	-0.0717	-0.3573	-0.3545	-0.3396	-0.3332
\mathbf{q}_{24}	-0.1953	-0.1094	-0.2226	-0.0023	1.7220	1.8253	1.7317	1.6665

\mathbf{a}_i et \mathbf{b}_i par :

$$\mathbf{a}_1(\mu, \alpha, M_w, S, G) = \mathbf{a}'_1 (\mu - 1) \quad (5.41)$$

$$\mathbf{a}_2(\mu, \alpha, M_w, S, G) = \mathbf{a}'_2 \log_{10}(\mu) + \mathbf{a}''_2 \quad (5.42)$$

$$\mathbf{a}_3(\mu, \alpha, M_w, S, G) = \mathbf{a}'_3 \mu^2 + \mathbf{a}''_3 \mu + \mathbf{a}'''_3 \quad (5.43)$$

$$\mathbf{b}_1(\mu, \alpha, M_w, S, G) = \mathbf{b}'_1 (\mu - 1) \quad (5.44)$$

$$\mathbf{b}_2(M_w, S, G) = \mathbf{b}'_2 \quad (5.45)$$

$$\mathbf{b}_3(M_w, S, G) = \mathbf{b}'_3 \quad (5.46)$$

avec finalement :

$$\mathbf{a}'_1(\alpha, M_w, S, G) = (\mathbf{a}'_{11}M_w + \mathbf{a}'_{12})\alpha + \mathbf{a}'_{13}M_w + \mathbf{a}'_{14} \quad (5.47)$$

$$\mathbf{a}'_2(\alpha, M_w, S, G) = (\mathbf{a}'_{21}M_w + \mathbf{a}'_{22})\alpha + \mathbf{a}'_{23}M_w + \mathbf{a}'_{24} \quad (5.48)$$

$$\mathbf{a}''_2(\alpha, M_w, S, G) = (\mathbf{a}''_{21}M_w + \mathbf{a}''_{22})\alpha + \mathbf{a}''_{23}M_w + \mathbf{a}''_{24} \quad (5.49)$$

$$\mathbf{a}'_3(\alpha, M_w, S, G) = (\mathbf{a}'_{31}M_w + \mathbf{a}'_{32})\alpha + \mathbf{a}'_{33}M_w + \mathbf{a}'_{34} \quad (5.50)$$

$$\mathbf{a}''_3(\alpha, M_w, S, G) = (\mathbf{a}''_{31}M_w + \mathbf{a}''_{32})\alpha + \mathbf{a}''_{33}M_w + \mathbf{a}''_{34} \quad (5.51)$$

$$\mathbf{a}'''_3(\alpha, M_w, S, G) = (\mathbf{a}'''_{31}M_w + \mathbf{a}'''_{32})\alpha + \mathbf{a}'''_{33}M_w + \mathbf{a}'''_{34} \quad (5.52)$$

$$\mathbf{b}'_1(\alpha, M_w, S, G) = (\mathbf{b}'_{11}M_w + \mathbf{b}'_{12})\alpha + \mathbf{b}'_{13}M_w + \mathbf{b}'_{14} \quad (5.53)$$

$$\mathbf{b}'_2(M_w, S, G) = \mathbf{b}'_{21}M_w + \mathbf{b}'_{22} \quad (5.54)$$

$$\mathbf{b}'_3(M_w, S, G) = \mathbf{b}'_{31}M_w + \mathbf{b}'_{32} \quad (5.55)$$

Les \mathbf{a}'_{ij} , \mathbf{a}''_{ij} , \mathbf{a}'''_{ij} et \mathbf{b}'_{ij} sont, eux aussi, des coefficients empiriques dépendants du type de sol (S) et de la géographie (G). Ces coefficients sont présentés dans les tableaux 5.5 et 5.6.

Grâce à ces multiples paramètres, on retrouve les variations des $R\text{-}\mu\text{-}T$ calculés avec les données synthétiques de 2009. Cette nouvelle formule permet d'illustrer les variations du facteur R en fonction du type de sol, de la magnitude et de la rigidité post-élastique. La figure 5.32 compare la formule empirique 2009 avec celle de Miranda [Miranda 1993] pour les sols de type A, D et E avec une rigidité post-élastique nulle. On y présente les $R\text{-}\mu\text{-}T$ de l'Est et l'Ouest pour toutes les magnitudes de calcul et une ductilité de 6. La formule $R\text{-}\mu\text{-}T$ de Miranda pour les sols mous (sol de type E) est en fonction du paramètre de période $\frac{T}{T_g}$. On considérera dans notre cas une période du sol de $T_g = 1$ s. La figure 5.33 compare, quant à elle, la formule empirique 2009 avec celle de Nassar [Nassar et Krawinkler 1991] pour plusieurs valeurs de rigidité post-élastique (0 et 10%). Les $R\text{-}\mu\text{-}T$ présents sur cette figure sont ceux de l'Est et de l'Ouest pour toutes les magnitudes de calcul et une ductilité de 6. Le sol considéré est un sol de type C.

Pour finir, les figures en 3D 5.34, 5.35, 5.36 et 5.37 illustrent les variations de la formule

Tableau 5.5 Coefficients \mathbf{a}'_{ij} de la formule empirique 2009.

\mathbf{a}'_{ij}	EST				OUEST			
	A	C	D	E	A	C	D	E
\mathbf{a}'_{11}	0.0064	-0.0003	-0.0037	-0.0070	-0.0102	-0.0144	-0.0132	-0.0166
\mathbf{a}'_{12}	-0.035	0.0034	0.0281	0.0483	0.0748	0.1059	0.0947	0.1170
\mathbf{a}'_{13}	0.1502	0.1339	0.1835	0.2127	0.0322	-0.0023	-0.0025	-0.0227
\mathbf{a}'_{14}	-0.595	-0.4664	-0.7506	-0.9320	0.1507	0.3950	0.4218	0.5931
\mathbf{a}'_{21}	0.0833	-0.1937	-0.5172	-0.4760	0.1710	-0.0050	-0.0366	-0.0181
\mathbf{a}'_{22}	-0.7013	1.1104	3.1316	2.8746	-1.3934	-0.1641	0.1434	-0.0989
\mathbf{a}'_{23}	-0.5662	9.3394	13.1824	13.8480	-0.4037	2.7931	3.0756	1.8341
\mathbf{a}'_{24}	7.746	-53.7968	-77.6520	-81.5900	7.9089	-15.2540	-18.5491	-8.8328
\mathbf{a}''_{21}	-0.1168	0.0653	0.1268	0.0960	-0.0285	-0.0166	-0.0146	0.0105
\mathbf{a}''_{22}	0.8091	-0.3996	-0.7934	-0.5848	0.2388	0.1901	0.1279	0.0093
\mathbf{a}''_{23}	0.0231	-2.5941	-3.5376	-3.3675	-0.2611	-0.8485	-0.9511	-0.8376
\mathbf{a}''_{24}	-0.1936	17.4408	23.7801	22.6315	2.3296	6.3188	7.8073	6.5088
\mathbf{a}'_{31}	-0.0003	-0.0010	0.0000	0.0002	0.0001	-0.0002	0.0001	0.0008
\mathbf{a}'_{32}	0.0025	0.0059	0.0001	-0.0010	-0.0009	0.0008	-0.0010	-0.0054
\mathbf{a}'_{33}	0.0054	0.0154	0.0098	0.0090	0.0044	0.0129	0.0115	0.0060
\mathbf{a}'_{34}	-0.0237	-0.0786	-0.0506	-0.0440	-0.0134	-0.0671	-0.0615	-0.0297
\mathbf{a}''_{31}	0.0012	0.0101	0.0002	-0.0020	-0.0022	0.0006	-0.0021	-0.0100
\mathbf{a}''_{32}	-0.0155	-0.0586	-0.0008	0.0135	0.0180	0.0034	0.0193	0.0716
\mathbf{a}''_{33}	-0.0628	-0.1957	-0.1372	-0.1280	-0.0386	-0.1467	-0.1401	-0.0784
\mathbf{a}''_{34}	0.2735	0.9997	0.7152	0.6448	0.0385	0.7285	0.7291	0.3556
\mathbf{a}'''_{31}	0.0090	-0.0168	0.0012	0.0031	0.0045	-0.0012	0.0022	0.0112
\mathbf{a}'''_{32}	-0.0280	0.0979	-0.0084	-0.0217	-0.0329	-0.0041	-0.0241	-0.0842
\mathbf{a}'''_{33}	-0.4258	-0.1191	-0.1870	-0.2057	-0.5670	-0.2647	-0.2302	-0.1752
\mathbf{a}'''_{34}	2.6696	1.1004	1.3090	1.4399	3.6768	1.7725	1.5097	1.0483

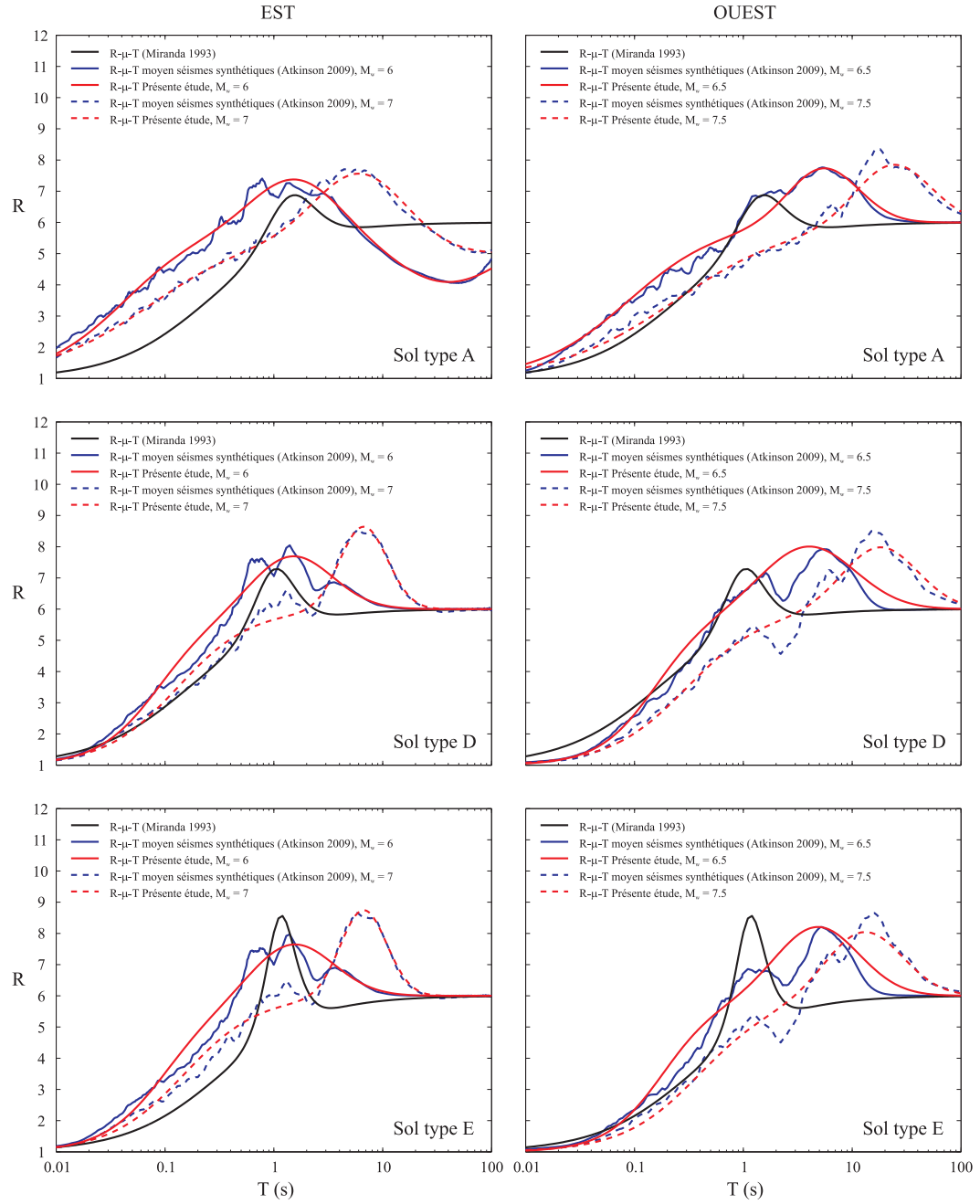


FIG. 5.32 : Comparaison des formules $R-\mu-T$ selon les types de sol pour une rigidité post-élastique nulle

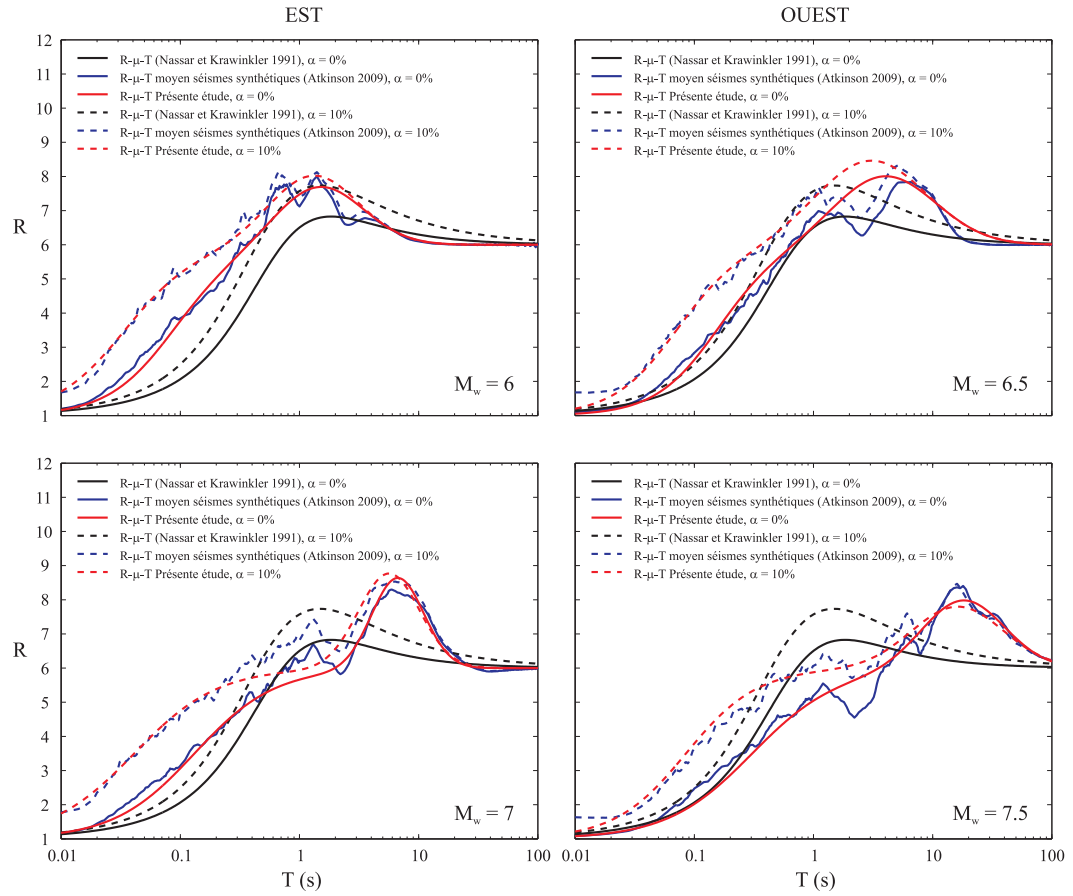


FIG. 5.33 : Comparaison des formules $R-\mu-T$ selon la rigidité post-élastique pour un sol de type C

Tableau 5.6 Coefficients \mathbf{b}'_{ij} de la formule empirique 2009.

\mathbf{b}'_{ij}	EST				OUEST			
	A	C	D	E	A	C	D	E
\mathbf{b}'_{11}	-0.0065	0	0	0	0	0	0	0
\mathbf{b}'_{12}	0.0463	0	0	0	0	0	0	0
\mathbf{b}'_{13}	0.1867	0	0	0	0	0	0	0
\mathbf{b}'_{14}	-1.5019	0	0	0	0	0	0	0
\mathbf{b}'_{21}	-1.294	0	0	0	0	0	0	0
\mathbf{b}'_{22}	9.3997	0	0	0	0	0	0	0
\mathbf{b}'_{31}	-0.395	0	0	0	0	0	0	0
\mathbf{b}'_{32}	0.7669	0	0	0	0	0	0	0

2009 selon plusieurs variables (T, μ, R) , (T, α, R) , (T, S, R) et (α, μ, R) .

À des fins pratiques, on pourra utiliser un des deux utilitaires de calcul développés dans le cadre de ce projet (EXCEL ® ou MATLAB ®) pour obtenir et visualiser les nouvelles relations R - μ - T et les comparer à d'autres relations classiques. La figure 5.38 est une capture d'écran de ces deux utilitaires. Ces développements auront des applications directes dans le domaine du dimensionnement performant des structures en Amérique du Nord, et notamment à l'Est Canadien (voir chapitre 6).

5.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude sur le facteur de réduction de force R . On a montré que ce paramètre variait plus vite à l'Est en fonction de la période, qu'il présentait un palier oscillant autour de la ductilité, une bosse post-palier puis un trou et tendait enfin vers la valeur de la ductilité. La bosse est plus importante pour les données de l'Ouest alors que le trou se retrouve presque uniquement à l'Est. On a alors développé une première formule

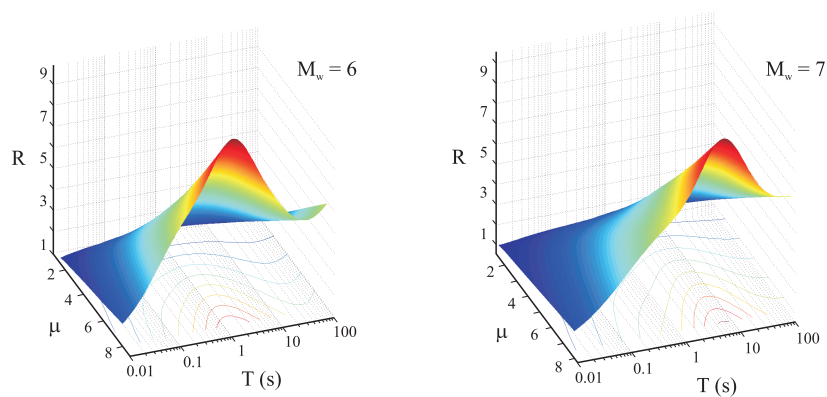


FIG. 5.34 : Représentation en 3 dimensions de la formule 2009 en fonction de μ et T pour le sol de type A et $\alpha = 0\%$

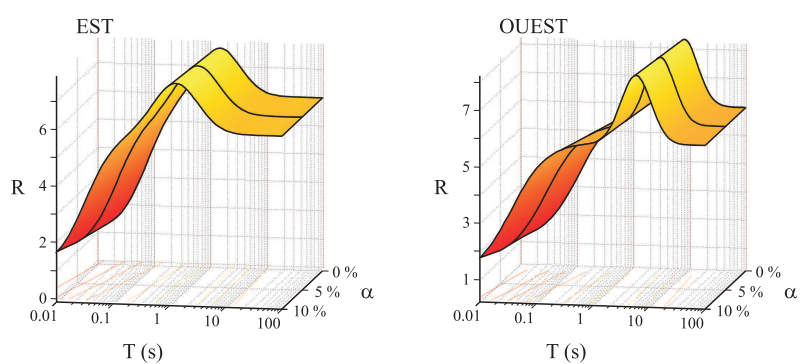


FIG. 5.35 : Représentation en 3 dimensions de la formule 2009 en fonction de α et T pour le sol de type C et une ductilité de 6

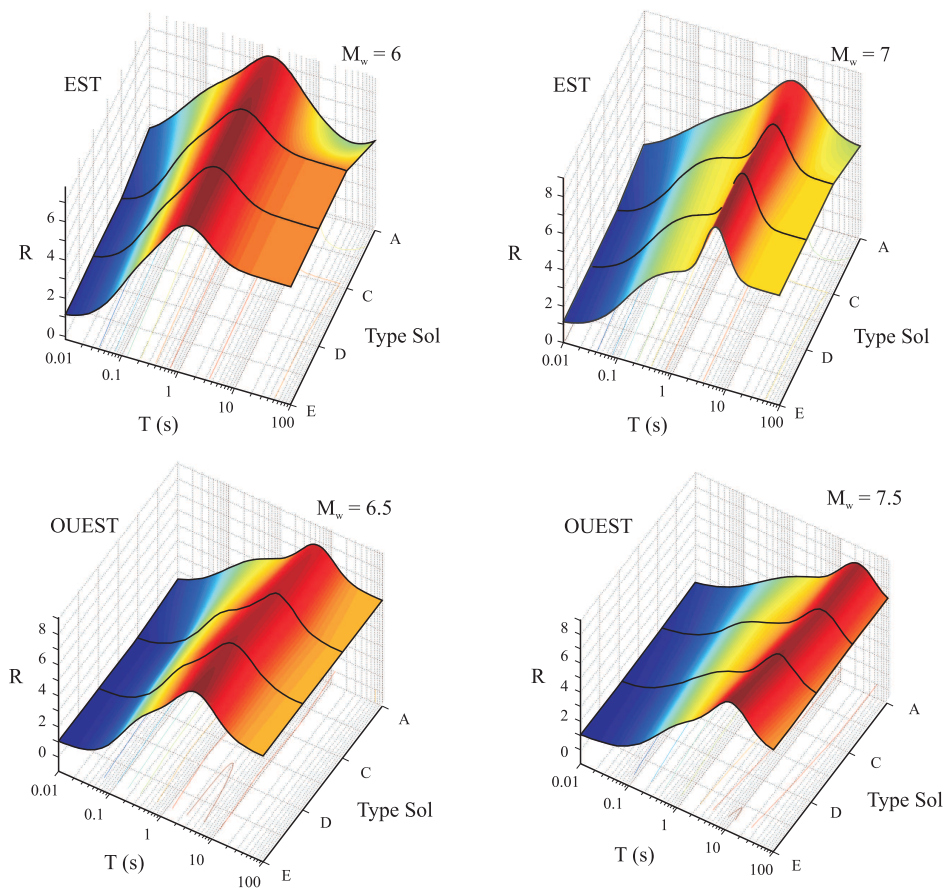


FIG. 5.36 : Représentation en 3 dimensions de la formule 2009 en fonction de S et T pour $\alpha = 0\%$ et une ductilité de 6

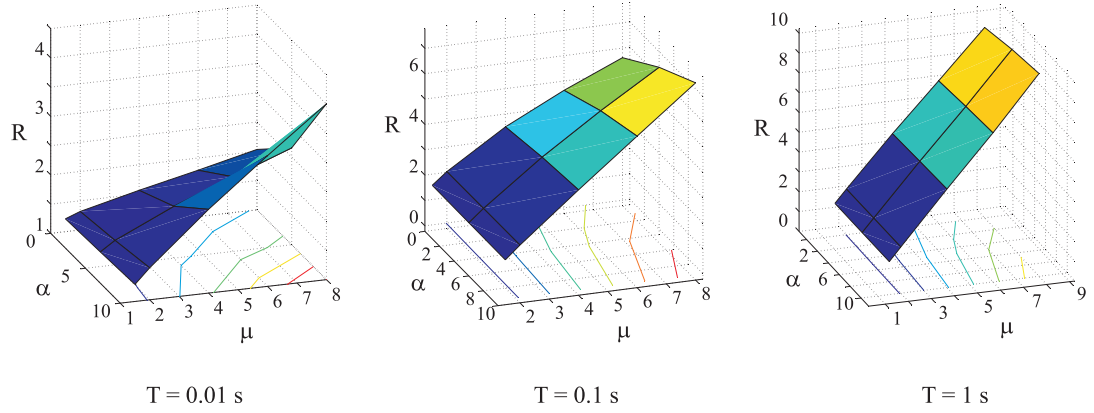


FIG. 5.37 : Représentation en 3 dimensions de la formule 2009 en fonction de μ et α pour le sol de type A de l'Est et une magnitude de 6

empirique prenant en compte les différences entre l'Est et l'Ouest qui pourrait inspirer le code canadien pour le dimensionnement performant des structures. Cette formule se résume en :

$$R^{(\mu)}(T) = f(\mu - 1) + 1 + P(\mu, T) + H(\mu, T) \quad (5.56)$$

avec $f(\mu, T)$ la fonction permettant d'obtenir la forme générale d'un graphique R - μ - T et valant :

$$f(\mu, T) = \frac{10^{\kappa(\mu, T)}}{1 + 10^{\kappa(\mu, T)}} \quad \text{et} \quad \kappa(\mu, T) = p(\mu) \log_{10}(T) + q(\mu) \quad (5.57)$$

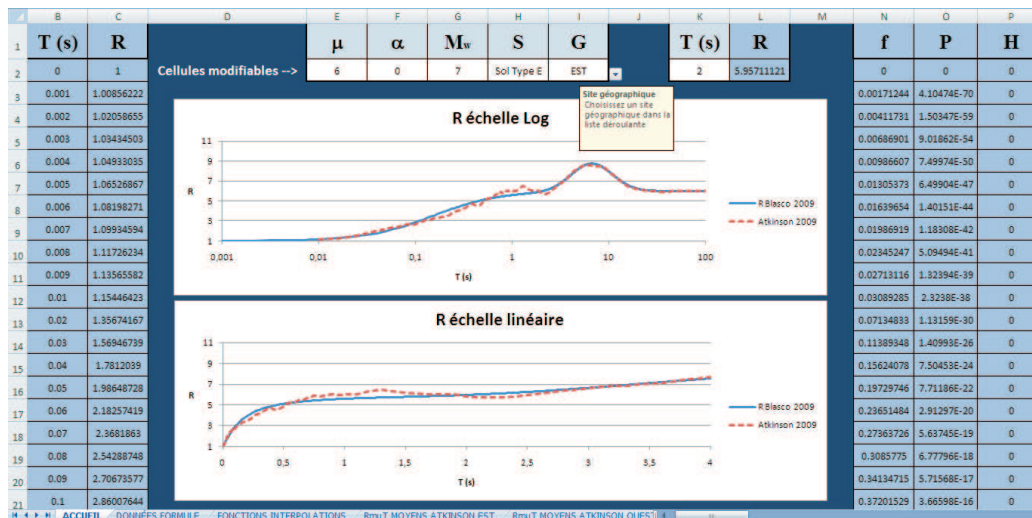
Et P et H les fonctions permettant de prendre en compte la bosse post-oscillation et l'effet de trou :

$$P(\mu, T) = a_1(\mu) e^{-a_2(\mu)(\log_{10}(T) + a_3(\mu))^2} \quad (5.58)$$

$$H(\mu, T) = b_1(\mu) e^{-b_2(\mu)(\log_{10}(T) + b_3(\mu))^2} \quad (5.59)$$

p , q , a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 et b_3 étant des fonctions d'interpolation en fonction de la ductilités qui sont détaillées dans le contenu du chapitre.

(a)



(b)

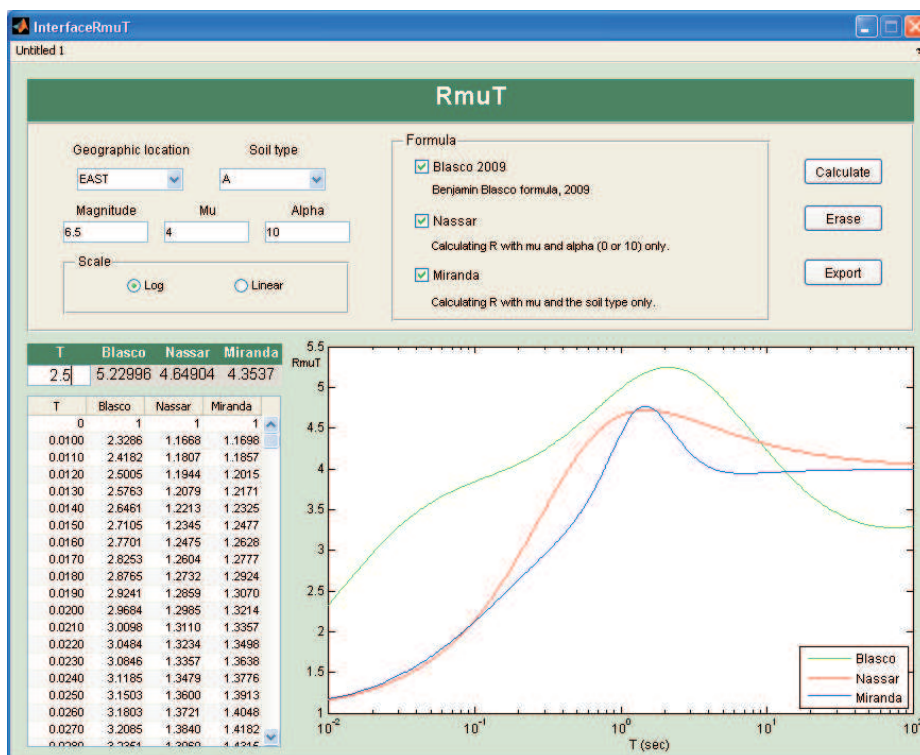


FIG. 5.38 : Capture d'écran de l'utilitaire de calcul Excel développé dans le cadre de ce projet pour illustrer les relations R - μ - T .

On a étendu cette formule en y ajoutant les paramètres de type de sol, de rigidité post-élastique et de magnitude. Cette dernière formule reste identique à la première excepté les fonctions p , q , a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 et b_3 qui dépendent à présent de μ , α , S , M_w et G . Ces développements ont été détaillés dans ce chapitre et ont été implémentés dans deux utilitaires EXCEL ® et MATLAB ® destinés à l'usage pratique de l'ingénieur.

Dans la prochaine et dernière partie de ce mémoire, on souhaite utiliser ces outils de caractérisation sur quelques exemples de structures en béton armée déjà dimensionnées. On aimerait ainsi valider nos résultats sur les rapports d'amplitude de spectres et sur les formules R - μ - T .

CHAPITRE 6

APPLICATIONS POSSIBLES AUX STRUCTURES DES OUTILS DE CARACTÉRISATION

6.1 Introduction

On présente dans ce chapitre quelques applications directes des études présentées dans les chapitres précédents de ce mémoire.

La méthodologie et les résultats obtenus permettent d'abord de construire des spectres de plastification, appelés Yield Point Spectra en anglais (YPS), servant à appliquer des méthodes de dimensionnement basées sur les déplacements plastiques. On utilise les formules $R-\mu-T$ empiriques de la littérature et celles développées dans le cadre de ce projet pour calculer des YPS de dimensionnement.

On développe ensuite un exemple de dimensionnement basé sur la performance d'une pile de pont. On utilise la méthode YPS de Black [Black 2000] sur deux ponts : l'un situé à Vancouver en Colombie Britannique sur un sol de type C et E et l'autre situé à La Malbaie au Québec sur un sol A et C. On considère deux comportements non-linéaires : l'un élasto-plastique parfaitement plastique et l'autre présentant une rigidité post-élastique de 10%. On souhaite comparer ainsi l'effet des formules $R-\mu-T$, du sol et de la rigidité post-élastique sur le dimensionnement de cette structure.

À la fin du chapitre, on présente deux outils de calcul des spectres sismiques, similaire à SEISMOSIGNAL et BISPEC, utilisant des passerelles avec le programme libre 'open source' OPENSEES [McKenna 2000]. On expose ensuite, un principe de génération de spectres et accélérogrammes verticaux artificiels utilisant des spectres horizontaux et les rapports d'amplitude verticaux. On débat enfin des méthodes traditionnelles permettant d'évaluer l'effet des charges sismiques multi-directionnelles. Ces principes sont à remettre en question pour les rapports d'amplitude de spectre trouvés dans la présente étude.

6.2 Spectre de plastification (YPS)

La notion de spectre de plastification (Yield Point Spectra ou YPS en anglais) est présentée dans ce paragraphe. Ce spectre de réponse sismique représente le coefficient de force plastique C_y en fonction du déplacement plastique u_y pour une ductilité fixée. On définit $C_y^{(\mu)}$ pour une ductilité μ fixée de la façon suivante :

$$C_y^{(\mu)} = \frac{f_y^{(\mu)}}{m g} = \frac{A^{(\mu)}}{g} \quad (6.1)$$

où l'on rappelle que $f_y^{(\mu)}$, $A^{(\mu)}$, m et g sont respectivement la force de plastification, le spectre d'accélération inélastique, la masse du système oscillant et la pesanteur terrestre.

6.2.1 Spectres de plastification exacts

Pour les séismes de la base de données, ces variables ont déjà été calculées par RSPECTRUM. En effet, le déplacement plastique correspond au rapport entre la force à la plastification f_y et la rigidité k . Le coefficient de force plastique est très similaire au pseudo-spectre d'accélération non-linéaire divisé par l'accélération terrestre g . Ainsi, on peut tracer les YPS "exacts" pour chaque séisme. On présente un exemple de YPS "exacts" à la figure 6.1 calculés avec RSPECTRUM (développé dans le cadre de ce travail), USEE® [Inel et al. 2001] et SEISMOSIGNAL® [Antoniu 2003]. On remarque toujours que SEISMOSIGNAL surestime les valeurs spectrales (Observation du paragraphe 4.2.3).

Pour un déplacement plastique ou un coefficient de force plastique donné, on peut retrouver la période propre du système oscillant (figure 6.2). Pour cela il faut tracer la demi-droite partant de l'origine du repère et mesurer l'angle β entre cette droite et l'axe

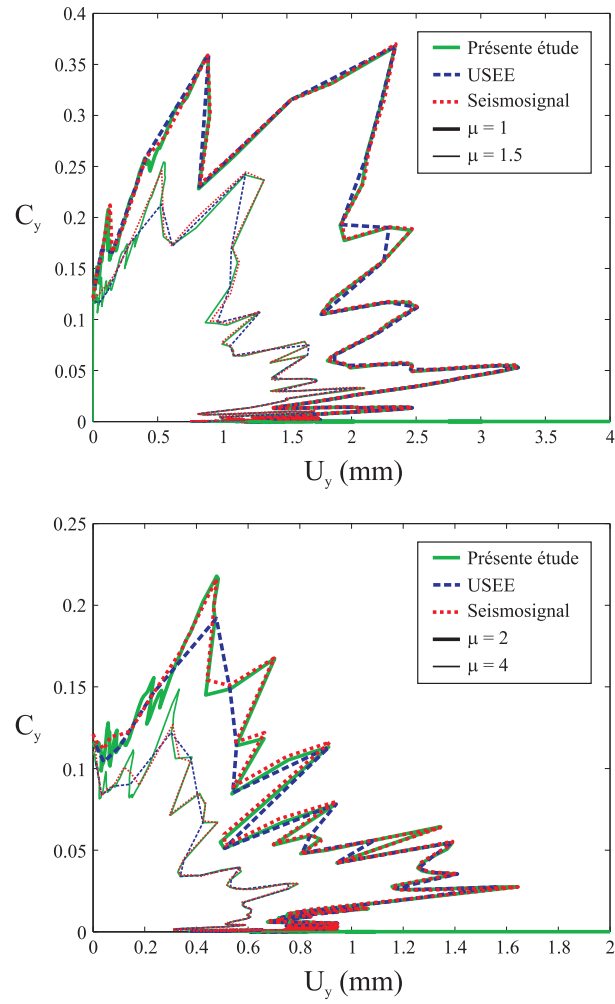


FIG. 6.1 : Exemple de YPS "exact" pour le séisme SAG1 ENR calculé par RSPECTRUM, USEE et SEISMOSIGNAL

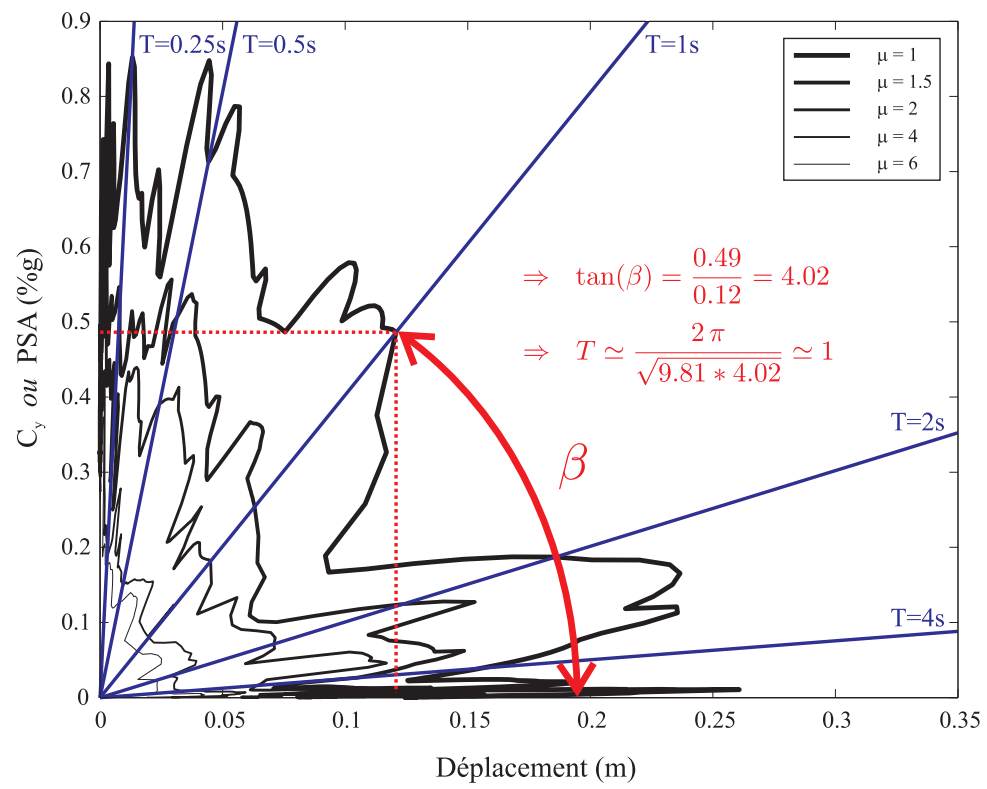


FIG. 6.2 : YPS "exact" du séisme IMP ENR détaillé

des abscisses. On obtient les relations suivantes :

$$\tan(\beta) = \frac{C_y^{(\mu)}}{u_y^{(\mu)}} = \frac{A^{(\mu)}}{g u_y^{(\mu)}} \simeq \frac{\omega^2 u_y^{(\mu)}}{g u_y^{(\mu)}} \quad (6.2)$$

$$\tan(\beta) \simeq \frac{4 \pi^2}{g T^2} \quad (6.3)$$

et donc :

$$T \simeq \frac{2 \pi}{\sqrt{g \tan(\beta)}} \quad (6.4)$$

6.2.2 Spectres de plastification approximatés

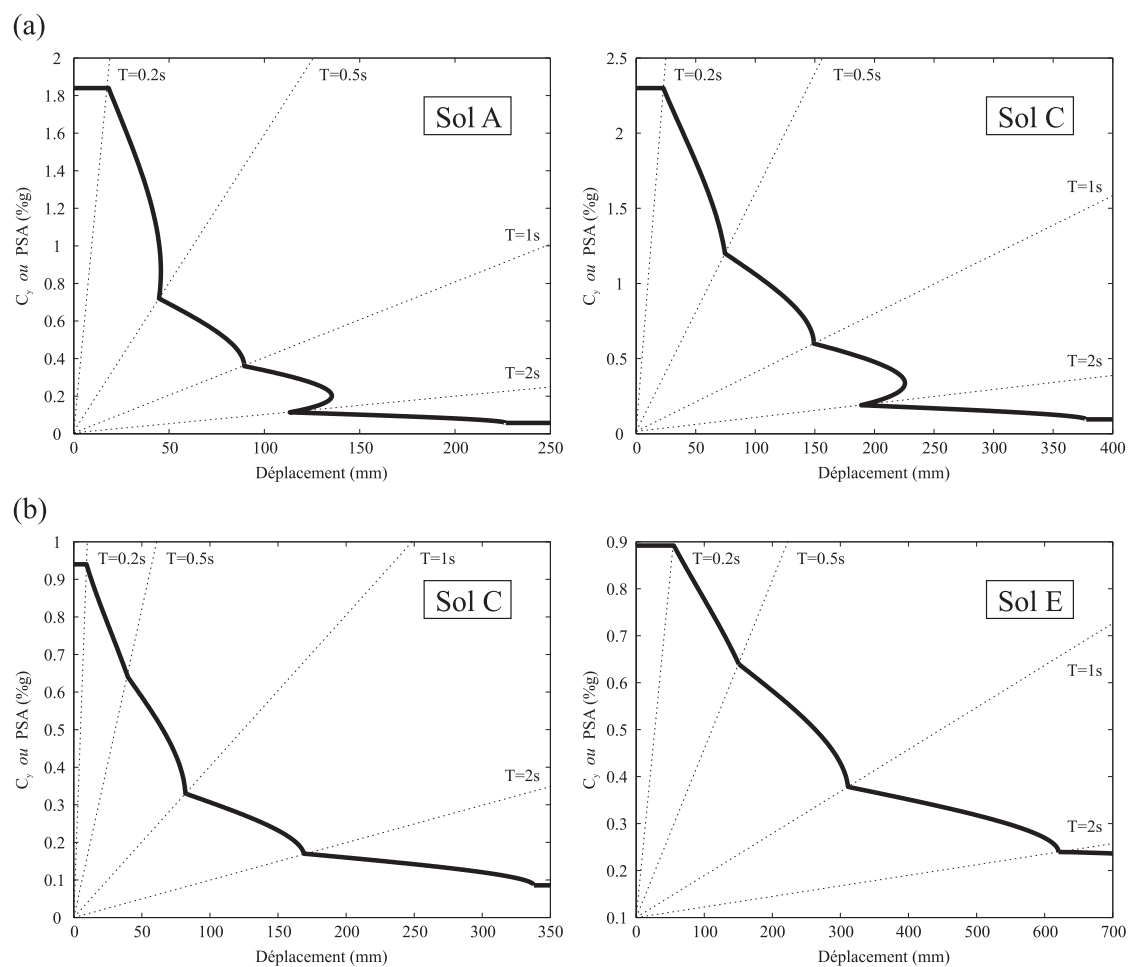
On différencie les YPS exacts calculés à partir d'une secousse sismique donnée, des YPS "approximatés" (ou "lissés") construits grâce aux spectres de dimensionnement des normes parasismiques. En effet, on peut tracer un YPS élastique à partir des données du spectre du Code National du Bâtiment CNB 2005 [Bouaanani et Alexieva 2006]. On notera les variables du spectre de plastification approximaté \tilde{C}_y et \tilde{u}_y . Appelons A_{code} le spectre d'accélération élastique du code pour une ville et un sol donnés. On calcule les variables \tilde{C}_y et \tilde{u}_y élastiques pour chaque période de la manière suivante :

$$\tilde{C}_y^{(1)} = \frac{A_{code}}{g} \quad (6.5)$$

$$\tilde{u}_y^{(1)} = \frac{A_{code}}{\omega^2} = \frac{A_{code} T^2}{4 \pi^2} \quad (6.6)$$

On obtient alors des YPS approximaté élastiques présentant une allure similaire aux YPS exacts élastiques (figure 6.3).

Pour calculer à présent les YPS approximatés inélastiques, on doit utiliser des formules empiriques $R\mu T$. C'est ici que le travail sur les facteurs de réduction de force peut s'appliquer.



On calcule les variables inélastiques du spectre de plastification comme tel :

$$\tilde{C}_y^{(\mu)} = \frac{\tilde{C}_y^{(1)}}{R^{(\mu)}} \quad (6.7)$$

$$\tilde{u}_y^{(\mu)} = \frac{\tilde{u}_y^{(1)}}{R^{(\mu)}} \quad (6.8)$$

On construit alors des YPS inélastiques basés sur le spectre du code. On compare les différents YPS obtenus avec les formules R - μ - T de la littérature et celle développée dans ce mémoire à la figure 6.4. On illustre aussi les différents effets des sols et de la rigidité post-élastique sur ces YPS approximés avec la formule développée dans ce mémoire sur la figure 6.5. Pour finir, on représente les YPS exacts et approximés des villes de Montréal et Québec pour une magnitude $M_w = 7$ à la figure 6.6.

6.3 Exemple de dimensionnement performant

Dans ce paragraphe, on présente un exemple de dimensionnement performant utilisant les spectres de plastification approximés. On commence par définir la notion de dimensionnement performant puis l'on détaille la méthode utilisant les spectres de plastification. On illustre ensuite cette méthode sur un exemple de pile de pont située au Québec ou en Colombie-Britannique. On compare les valeurs de déplacements maximaux, de cisaillement à la base et de pourcentage d'armature calculés par cette méthode et celle traditionnelle selon l'endroit géographique, le type de sol et la rigidité post-élastique.

6.3.1 Définitions du dimensionnement performant

Le dimensionnement performant, ou dimensionnement basé sur la performance, constitue une méthode alternative à celles préconisées par la plupart des normes de conception parasismiques internationales. La logique de cette méthode est de relier plusieurs niveaux d'aléas sismiques anticipés à des objectifs spécifiques de performance structurale (déplacement maximal, rotation plastique admissible,...).

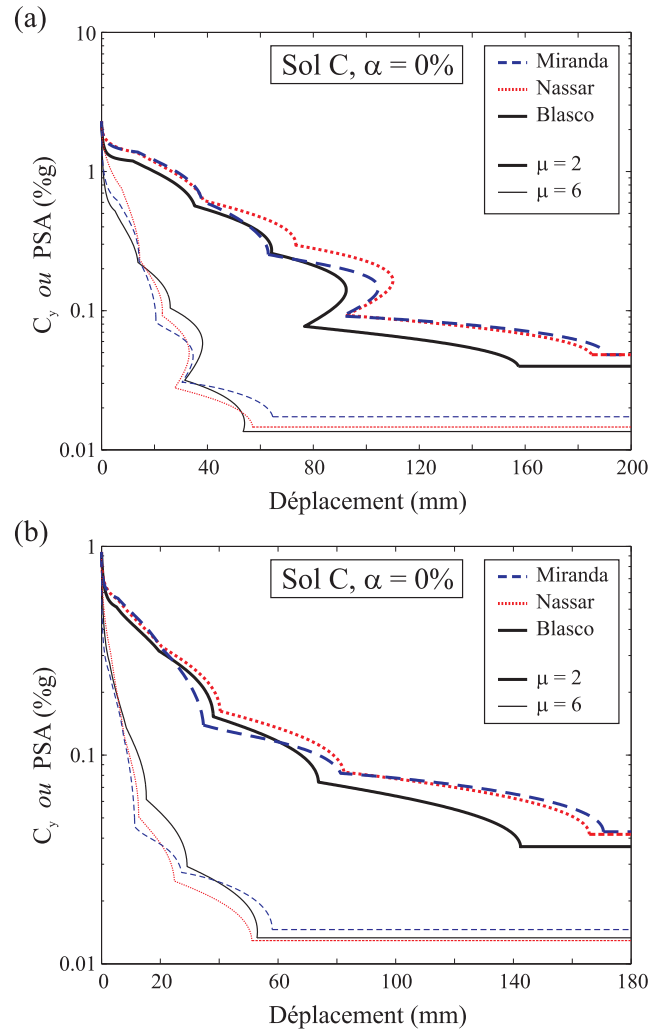


FIG. 6.4 : YPS approximés inélastiques pour les villes de La Malbaie (a) et Vancouver (b) utilisant différentes formules $R-\mu-T$

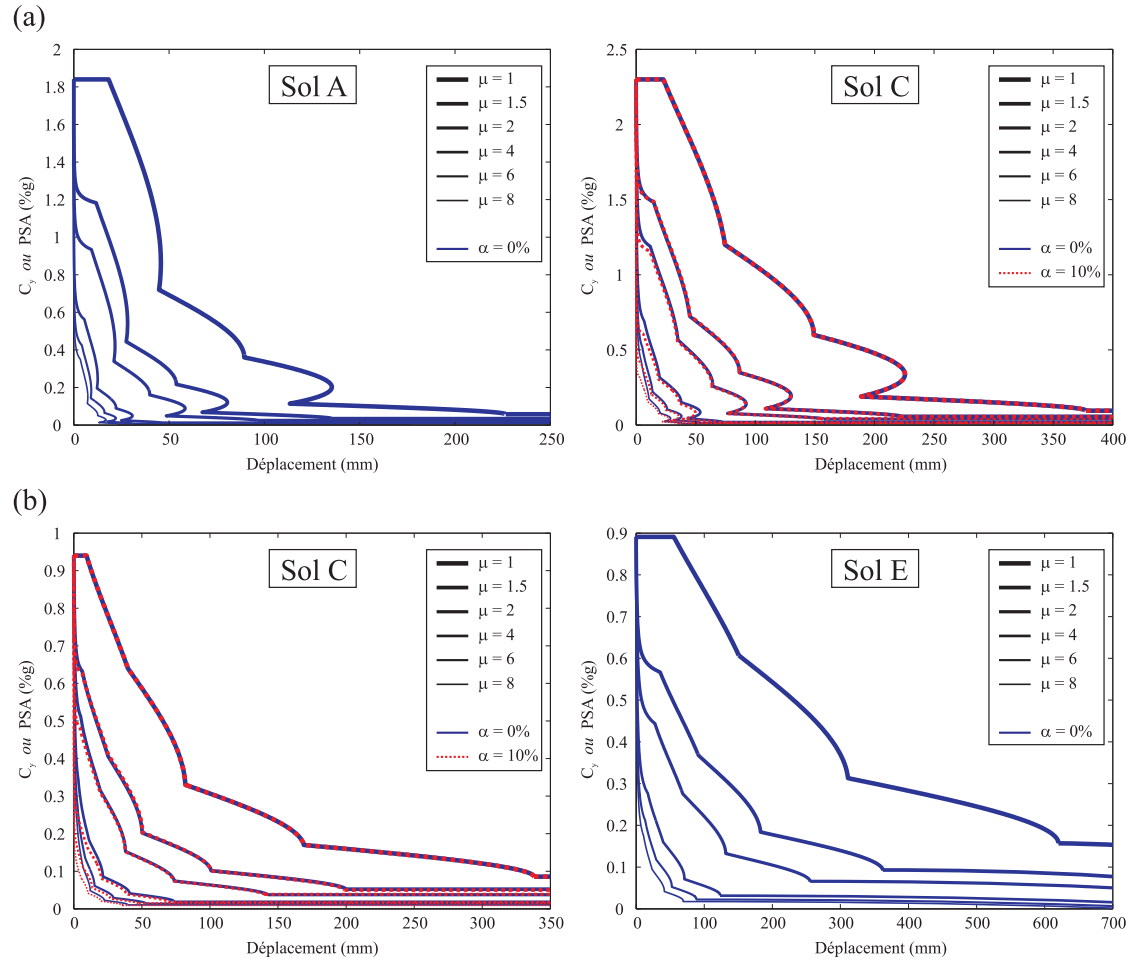


FIG. 6.5 : YPS approximés inélastiques pour les villes de La Malbaie (a) et Vancouver (b) utilisant la formule Blasco 2009

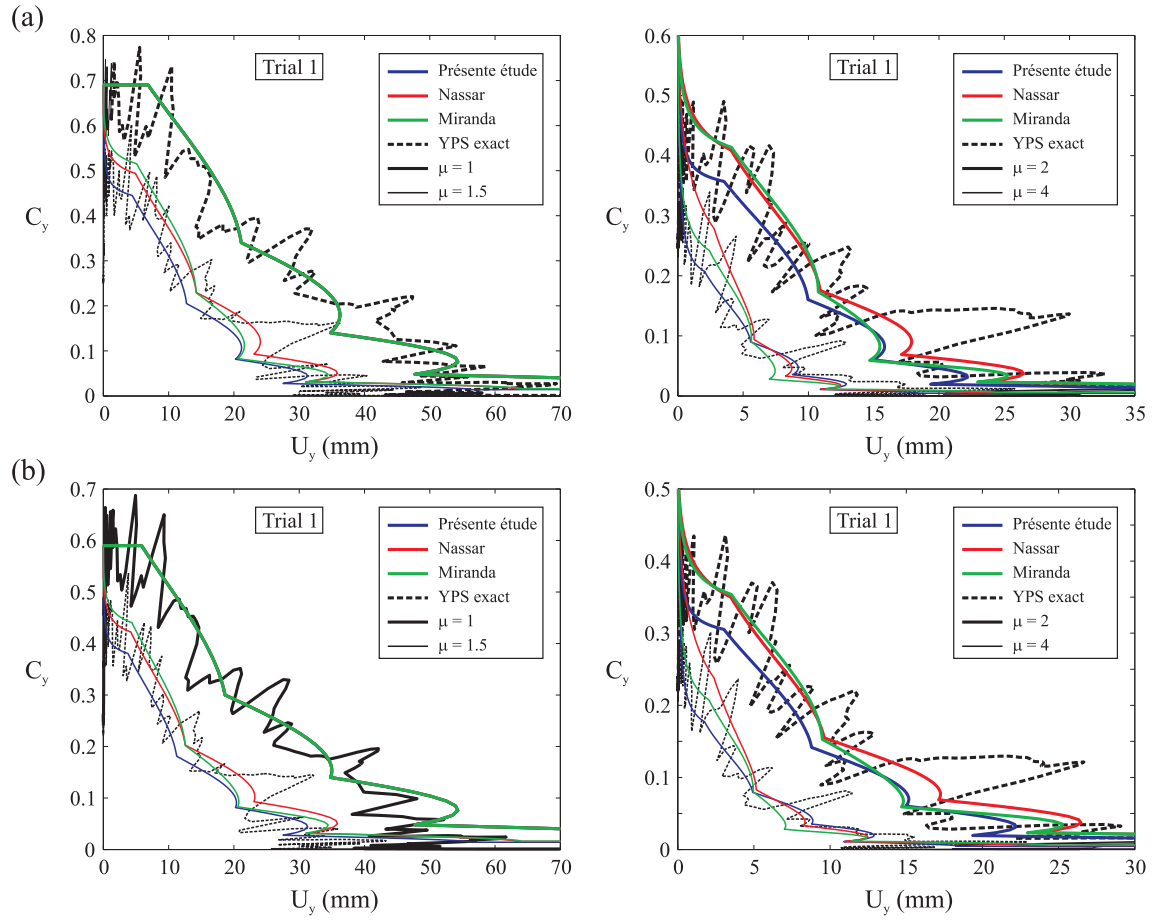


FIG. 6.6 : YPS exacts et approximés des villes de Montréal (a) et Québec (b) pour $M_w = 7$

La méthode actuelle du CNB 2005 [CNB 2005] est une procédure basée sur les forces sismiques. Elle nécessite, en premier lieu, une étude linéaire élastique pour calculer une force sismique élastique équivalente. Ce n'est qu'ensuite que l'on prend en compte le comportement non-linéaire de la structure en divisant cette force équivalente élastique par un facteur de modification de force. On applique alors à la structure une distribution de force inélastique puis l'on vérifie les critères de déformation et l'on contrôle le comportement ductile des matériaux.

Le dimensionnement basé sur les forces sismiques permet de construire des structures sécuritaires. Cependant il semble que, lors de séismes de forte amplitude, les structures dimensionnées par cette méthode ne respectent généralement pas les critères de performance. Depuis une dizaine d'années, la communauté scientifique porte un certain intérêt au dimensionnement performant qui pourrait être une alternative aux méthodes actuelles. Cette dernière méthode donnerait plus de flexibilité à l'ingénieur pour atteindre les objectifs de performance et d'économie. Parmi les approches de dimensionnement performant, on retient particulièrement celle du dimensionnement basé sur les déplacements [Priestley et Kowalsky 2000]. Ce processus est de plus en plus accepté par les spécialistes et commence à être utilisé dans certains codes modernes. Malgré tout, ces méthodes nécessitent toujours des validations et raffinements avant d'être globalement adoptées.

6.3.2 Méthode de dimensionnement utilisant le YPS

La méthode du spectre de plastification est basé sur le déplacement plastique, une variable stable, plutôt que sur la période de vibration, une variable plus sensible [Black 2000]. L'adoption par la communauté scientifique d'une telle méthode semble plus simple car elle donne une valeur de cisaillement à la base comme la méthode actuelle. Ce processus peut être utilisé à la fois comme calcul préliminaire ou détaillé pour le dimensionnement sismique des structures neuves comme pour l'évaluation ou la réhabilitation de structures existantes.

Une étape importante de la méthode YPS est la construction des spectres de plastification approximatifs (paragraphe 6.2.2). Comme on l'a dit précédemment ces YPS sont calculés à partir du spectre du code basé sur un aléa sismique constant (paragraphe 2.6.1). La procédure YPS complète se résume en six étapes :

1. Estimer le déplacement plastique u_y en haut de la pile grâce à des considérations géométriques et des hypothèses sur les matériaux.
2. Fixer un déplacement maximal cible u_m du haut de la pile afin d'atteindre un certain niveau de performance. Ce critère de déplacement peut être obtenu par un objectif de contrôle du déplacement ou de la rotation plastique.
3. Calculer la demande en ductilité correspondante du système μ définie par :

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad (6.9)$$

4. Construire le spectre de plastification approximatif correspondant à la demande en ductilité μ comme décrit au chapitre 6.2.2
5. Déterminer le coefficient de force plastique $\tilde{C}_y^{(\mu)}$ correspondant au déplacement plastique u_y grâce au YPS construit.
6. Calculer le cisaillement équivalent V_y à la base de la structure avec l'équation :

$$V_y = \tilde{C}_y^{(\mu)} \cdot W \quad (6.10)$$

où W est le poids sismique appliqué au sommet de la pile de pont.

Une fois le cisaillement à la base calculé, on répartie une charge triangulaire équivalente sur la pile. Puisque les piles de pont peuvent être considérées comme des systèmes à un degré de liberté, il suffit d'appliquer une force ponctuelle équivalente F au sommet de la pile valant :

$$F = V_y \quad (6.11)$$

Il s'en suit un dimensionnement classique d'une structure soumise à un chargement ponc-

tuel.

6.3.3 Application de la méthode YPS à un exemple

On souhaite illustrer la méthode YPS sur un exemple de pile de pont située au Québec et en Colombie-Britannique. La structure en question est un pont existant de la région de Trois-Rivières au Québec (figure 6.7) enjambant une autoroute. Il possède deux travées de 37.13 m chacune, deux culées et une pile constituée de 3 colonnes surmontées d'un chevetre. La pile repose sur des fondations à pieux et sera considérée comme encastree à la base dans cet exemple. Le poids de la chaussée est approximé à 85 kN/m, celui d'une poutre à 17 kN/m et celui du chevetre à 385 kN. Le poids sismique total du tablier vaut donc 17.674 MN. Or d'après les aires tributaires, la pile centrale ne reprend que le poids sismique de la moitié du tablier et celui du chevetre. On trouve un poids sismique porté par la pile de $W_p = 9.222$ MN. On négligera dans notre étude le poids des colonnes.

Ce poids sismique sera appliqué au centre de gravité de l'ensemble tablier-chevetre. Le calcul du centre de gravité donne :

$$\begin{aligned}
 y_{G, \text{tot}} &= \frac{y_{G, \text{chevetre}} * W_{\text{chevetre}} + y_{G, \text{poutres}} * W_{\text{poutres}} + y_{G, \text{chaussée}} * W_{\text{chaussée}}}{W_{\text{tot}}} \\
 &= \frac{3.732 * 385 + 5.522 * 5681 + 6.463 * 3156}{9222} \\
 &= 5.77 \text{ m}
 \end{aligned}$$

avec $y_{G, \ell}$ la coordonnée du centre de gravité de la structure ℓ par rapport au sol.

Ainsi, le modèle à un degré de liberté équivalent possède une masse de 940 tonnes appliquée à une hauteur $H = 5.77$ m, une partie rigide indéformable (chevetre et bas des poutres) de $H_b = 2.87$ m et une partie flexible (colonne) d'une hauteur $H_c = 2.9$ m (figure 6.8)

Avant de pouvoir appliquer la méthode de dimensionnement YPS, il faut expliciter le

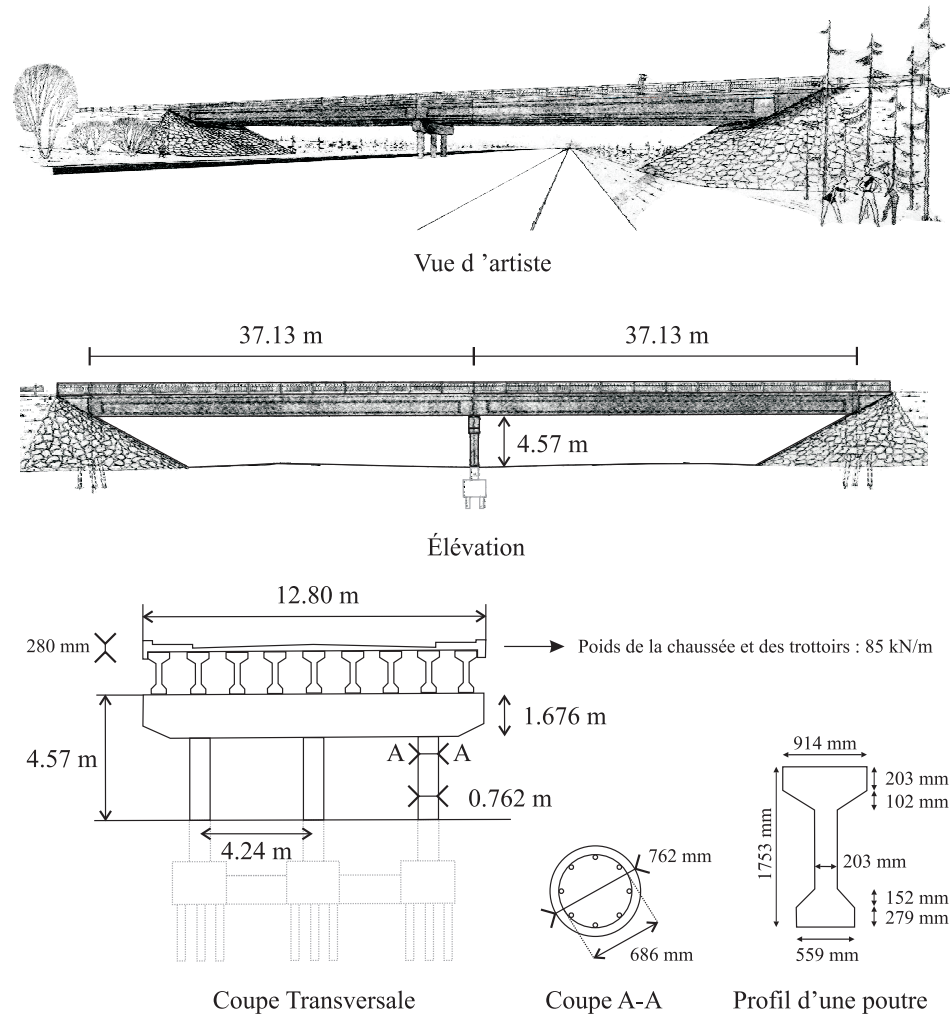


FIG. 6.7 : Plan du pont et de la pile à l'étude [adapté des archives du Ministère des Transports du Québec]

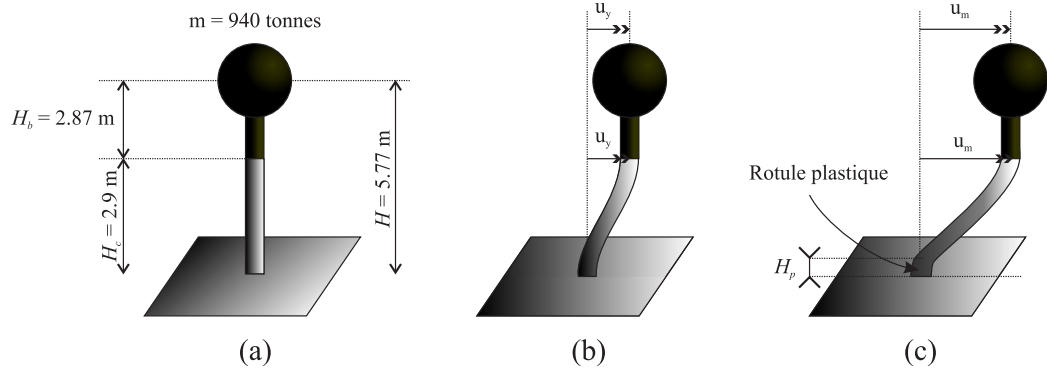


FIG. 6.8 : Modèle à un degrés de liberté équivalent à la pile de pont étudiée (a), situation déformée à la plastification (b) et à l'ultime (c)

déplacement plastique u_y et le critère de déplacement ultime u_m . Priesley [Priestley, Seible et Calvi 1996] donne une relation empirique reliant le déplacement plastique u_y à la courbure plastique φ_y :

$$u_y = \varphi_y \frac{H_c^2}{3} \quad (6.12)$$

où la courbure φ_y peut être approximé par :

$$\varphi_y = \frac{2.45 \varepsilon_{ys} \pm 15\%}{D} \quad (6.13)$$

D étant le diamètre de la section circulaire et ε_{ys} la déformation plastique de l'acier. Cette dernière valeur est usuellement prise égale à 0.002.

En ce qui concerne le critère de déplacement ultime, le code canadien ne spécifie aucune exigence de performance dans le domaine des ponts. On utilisera dans notre exemple un critère basé sur la courbure ultime φ_u donné dans l'*Eurocode 8* [CEN 2003]. Ce critère relie directement la courbure ultime φ_u aux déformations ultimes du béton ε_{uc} et de l'acier ε_{us} et à la profondeur effective de la colonne d_e .

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{us} - \varepsilon_{uc}}{d_e} \quad (6.14)$$

On prendra usuellement comme déformation ultime du béton non confiné $\varepsilon_{uc} = -0.0035$ et pour l'acier d'armement de classe C, $\varepsilon_{us} = 0.075$. Dans notre étude, on approximera d_e par :

$$d_e \simeq 0.85 D \quad (6.15)$$

On utilise enfin la formule donnée par Paultre [Paultre 2009] au chapitre "flexion simple" pour calculer le déplacement ultime u_m :

$$u_m = u_y + (\varphi_u - \varphi_y) H_p H_c \left(1 - \frac{H_p}{2 H_c} \right) \quad (6.16)$$

avec H_p la longueur de la rotule plastique, expérimentalement prise égale à $H_p = 0.75 d_e = 0.64 D$.

En définissant l'élancement du système oscillant $\gamma_\ell = \frac{H_c}{D}$, on résume les équations précédentes par :

$$u_y = 1.633 H_c \gamma_\ell 10^{-3} \pm 15\% \quad (6.17)$$

$$u_m = \frac{H_c}{\gamma_\ell} \left[1.6 \gamma_\ell^2 + 55.8 \gamma_\ell - 17.8 \pm (0.25 \gamma_\ell^2 + 0.47 \gamma_\ell - 0.15) \right] \times 10^{-3} \quad (6.18)$$

pour les déplacements plastique et ultime, et par :

$$\mu = \frac{1}{\gamma_\ell^2} (\gamma_\ell^2 + 34.13 \gamma_\ell - 10.88) \quad (6.19)$$

$$\mu_{\max} = \frac{1}{\gamma_\ell^2} (1.35 \gamma_\ell^2 + 40.49 \gamma_\ell - 12.91) \quad (6.20)$$

$$\mu_{\min} = \frac{1}{\gamma_\ell^2} (0.74 \gamma_\ell^2 + 29.43 \gamma_\ell - 9.38) \quad (6.21)$$

pour la ductilité médiane, maximale et minimale du système considéré. On représente à la figure 6.9 l'évolution de la ductilité en fonction de l'élancement γ_ℓ .

On peut dorénavant appliquer la méthode de dimensionnement du YPS pour notre

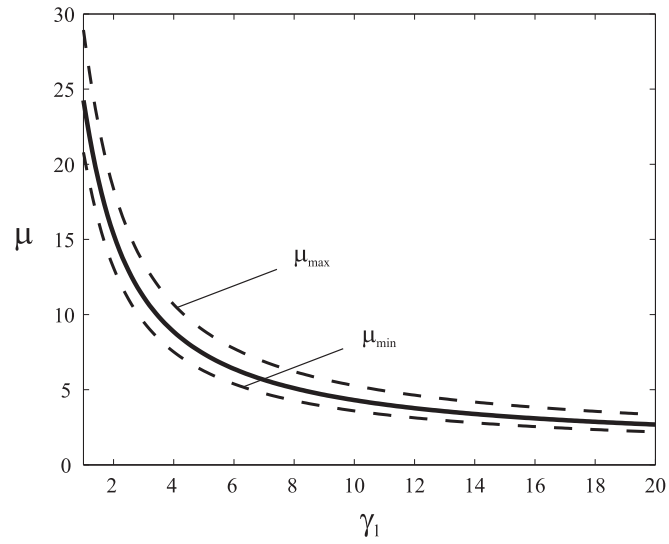


FIG. 6.9 : Évolution de la ductilité en fonction de l'élongement du système oscillant

exemple :

1. Estimer u_y en utilisant l'équation 6.17 :

$$u_y = 18 \pm 2.7 \text{ mm} \quad (6.22)$$

2. Calculer, à partir de l'équation 6.18, un déplacement maximal cible u_m découlant du critère de l'*Eurocode 8* sur la courbure ultime de la section :

$$u_m = 166 \pm 4 \text{ mm} \quad (6.23)$$

3. Calculer la ductilité μ définie par :

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad (6.24)$$

où en utilisant directement les formules 6.19, 6.20 et 6.21

$$\mu = 9.22 \quad (6.25)$$

$$\mu_{\max} = 11.1 \quad (6.26)$$

$$\mu_{\min} = 7.83 \quad (6.27)$$

4. Construire le spectre de plastification approximé pour $\mu = 9.22$.

On souhaite comparer le dimensionnement de cette pile de pont pour différents sites. On propose les sites de La Malbaie au Québec sur un sol de type A et C, et de Vancouver en Colombie Britannique sur un sol de type C et E. Les ponts sur les sols C seront calculés pour une rigidité post-élastique de 0% et 10%. On prendra une magnitude $M_w = 7$ pour La Malbaie et $M_w = 7.2$ pour Vancouver [Atkinson et Beresnev 1998]. On obtient six YPS de dimensionnement présentés à la figure 6.10. On représente, pour changer, l'accélération spectrale ($A_y = C_y g$) en fonction du déplacement plastique.

5. Déterminer $\tilde{C}_y^{(\mu)}$ correspondant à $u_y = 18 \text{ mm}$:

On résume les valeurs de \tilde{C}_y trouvées sur les YPS de la figure 6.10 dans le tableau 6.1.

6. En déduire le cisaillement V_y et la force équivalente à appliquer au sommet de la pile :

$$V_y = F_e = W \tilde{C}_y = 9222 * \tilde{C}_y \quad (\text{kN}) \quad (6.28)$$

On présente les valeurs de la force équivalente F_e dans le tableau 6.2.

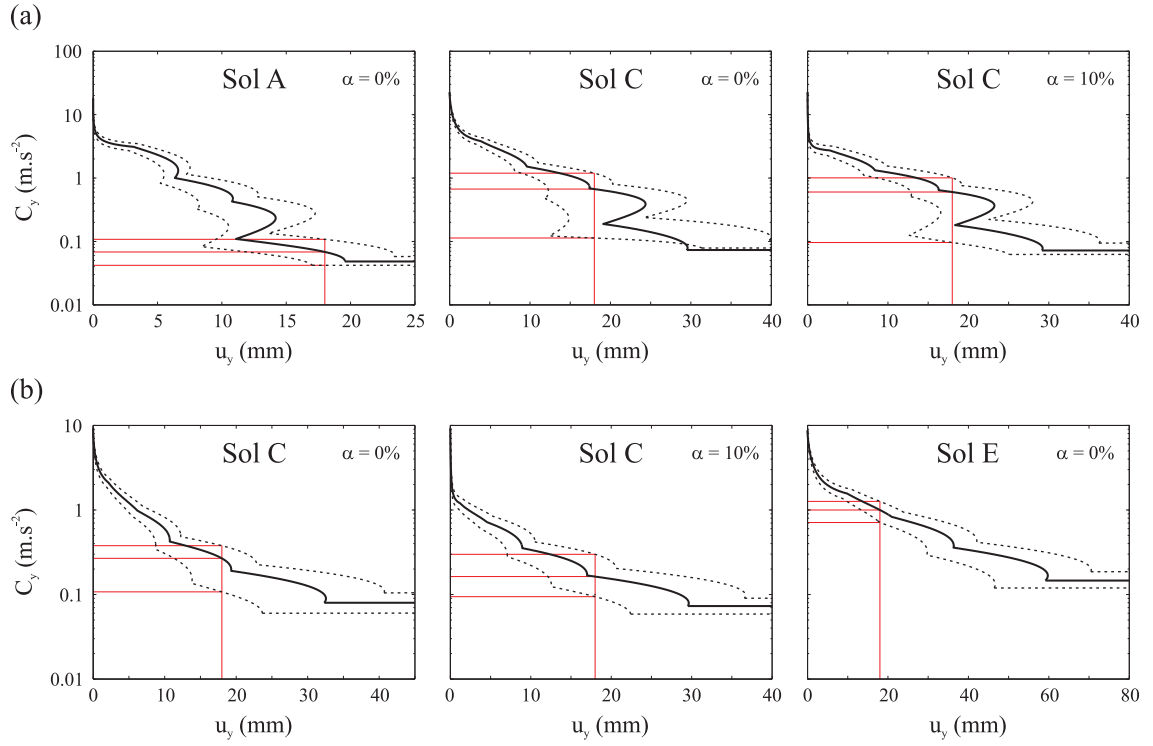


FIG. 6.10 : YPS de dimensionnement pour les sites de La Malbaie (a) et de Vancouver (b)

Tableau 6.1 Résumé des valeurs de \tilde{C}_y pour le dimensionnement.

	LA MALBAIE			VANCOUVER		
	sol A, 0%	sol C, 0%	sol C, 10%	sol C, 0%	sol C, 10%	sol E, 0%
$\tilde{C}_{y \max}$	0.0110	0.1213	0.1027	0.0385	0.0304	0.1287
\tilde{C}_y	0.0069	0.0683	0.0614	0.0273	0.0166	0.1018
$\tilde{C}_{y \min}$	0.0043	0.0115	0.0099	0.0109	0.0096	0.0714

Tableau 6.2 Valeurs de la force équivalente F_e pour le dimensionnement (kN).

	LA MALBAIE			VANCOUVER		
	sol A, 0%	sol C, 0%	sol C, 10%	sol C, 0%	sol C, 10%	sol E, 0%
$F_{e \max}$	101.4	1118.6	947.1	355.0	280.3	1186.9
F_e	63.6	629.9	566.2	251.8	153.1	938.8
$F_{e \min}$	39.7	106.1	91.3	100.5	88.5	658.5

6.3.4 Comparaison des résultats

On applique maintenant la force équivalente F_e au centre de masse et l'on repartie les forces et les moments sur une seule colonne. On supposera le chevêtre infiniment rigide et ne pouvant pas transmettre de moment aux colonnes. On obtient au sommet de chaque colonne un moment M_c provenant de la déformation encastré-encastré de la partie flexible de la structure :

$$M_c = \frac{F_e H_c}{6} \quad (6.29)$$

On observe aussi, pour les colonnes extérieures, des charges normales supplémentaires :

$$P_i = \frac{F_e}{4L}(2H_b + H_c) \quad (6.30)$$

où L est la distance entre les axes de deux colonnes consécutives. La charge totale normale de dimensionnement vaut alors $P_c = P_i + W_p/3$ pour la colonne la plus critique. On illustre ces simplifications de chargement à la figure 6.11.

On prendra dans tous nos exemples un béton ayant les caractéristiques suivantes : $f'_c = 40$ MPa et $\rho_c = 2400$ kg/m³ et un acier ayant une résistance de $f_y = 400$ MPa. Pour les chargements simplifiés (P_c , M_c), on trouve d'après les diagrammes de flexion composée

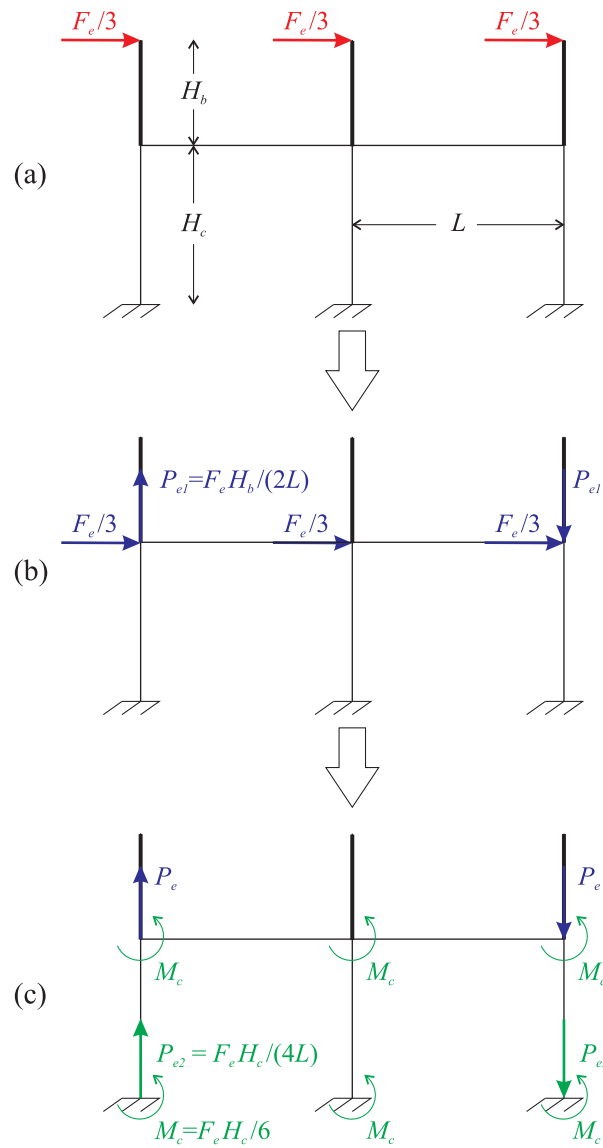


FIG. 6.11 : Chargements simplifiés de la pile à 3 colonnes. (a) Répartition de la force équivalente, (b) Déplacement des forces au sommet des colonnes, (c) Moments et charges longitudinales équivalents

du Concrete Design Handbook [CAC 2006], les pourcentages d'acier du tableau 6.3.

Tableau 6.3 Pourcentage d'acier ρ_t calculé d'après le dimensionnement YPS.

	LA MALBAIE			VANCOUVER		
	sol A, 0%	sol C, 0%	sol C, 10%	sol C, 0%	sol C, 10%	sol E, 0%
P_c (MN)	3.106	3.395	3.362	3.202	3.152	3.552
M_c (MN.m)	0.031	0.304	0.274	0.122	0.074	0.454
ρ_t	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02

Dans la méthode de dimensionnement performant utilisant les YPS, il n'est pas précisé de faire des itérations. Pourtant une autre méthode de dimensionnement basé sur le déplacement et sur la période de vibration oblige au concepteur de vérifier la valeur du déplacement plastique et d'itérer la procédure jusqu'à convergence. On se propose, ici d'effectuer une telle vérification.

La rigidité effective de ces colonnes dimensionnées avec 1 ou 2 % d'armature est donnée par la relation :

$$k = \frac{12 EI}{H_c^3} \quad (6.31)$$

où E est le module élastique du béton armé et I l'inertie effective de la section de béton armé. Le code canadien de béton [CAC 2006] donne une expression permettant de calculer l'inertie d'une section circulaire armée :

$$EI = \frac{0.2 E_c I_g + E_s I_{st}}{1 + \beta_d} \quad (6.32)$$

avec E_c et E_s les modules élastiques du béton et de l'acier, I_g et I_{st} les inerties de la section générale et des barres d'armature longitudinales et β_d le ratio de la charge permanente pondérée maximale par la charge pondérée maximale. Dans notre cas on prendra ces

variables égales à :

$$E_c = 4500\sqrt{f'_c} \quad (6.33)$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa} \quad (6.34)$$

$$I_g = \frac{\pi D^4}{64} \quad (6.35)$$

$$I_{st} = \frac{\pi \rho_t \gamma^2 D^4}{32} \quad (6.36)$$

$$\beta_d = 0 \quad (6.37)$$

où γ représente le rapport entre le diamètre de la colonne et le diamètre du cercle dessiné par les barres d'armature. Dans notre cas ces expressions se simplifient en :

$$k = \frac{3 \pi D^4 E_c}{16 H_c^3} (0.2 + 2 \frac{E_s}{E_c} \rho_t \gamma^2) \quad (6.38)$$

$$k = 4018.8 (\rho_t + 0.01153) \quad (6.39)$$

On trouve une rigidité de 86.5 kN/mm pour les colonnes à 1% d'armature et 126.7 kN/mm pour celle à 2% d'armature. La rigidité totale de la pile sera trois fois plus élevée soit 259.6 kN/mm pour 1% d'armature et 380.2 kN/mm pour 2% d'armature. Les déplacements plastiques correspondant à ces rigidités valent $u_y = \frac{F_e}{k}$ soit 35.5 et 24.3 mm pour les piles à 1 et 2% d'armature au lieu de 18 mm. Ces déplacements plastiques étant éloignés de ceux estimés à l'étape 1, on réitère le procédé de dimensionnement en prenant comme déplacement plastique $u_y = 35.5$ ou 24.3 mm et en utilisant l'équation 6.16 pour évaluer u_m . On présente les résultats des itérations pour chaque pile au tableau 6.4.

On remarque que la plupart du temps, une seule itération suffit pour obtenir le dimensionnement final. Cependant, les cas du sol C de La Malbaie ont demandé plusieurs itérations et l'un a même nécessité de forcer la convergence (* dans le tableau 6.4). Ce phénomène s'est produit car le calcul du pourcentage d'armature est fait à partir d'abaques et donne des valeurs discrètes. Lorsque l'on utilise une formule continue comme le fait Chopra

Tableau 6.4 Procédure itérative pour la méthode de dimensionnement utilisant les YPS.

	itéra ^o	u_y (mm)	u_m (mm)	μ	\tilde{C}_y	F_e (kN)	ρ_t (%)	k_{pile} (kN/m)	$u_{y, \text{réel}}$ (mm)
La Malbaie	1	18	166	9.22	0.0069	63.6	1	259.6	35.5
Sol A, $\alpha = 0\%$	2	35.5	176	4.96	0.0124	114.4	1	259.6	35.5
La Malbaie	1	18	166	9.22	0.0683	629.9	1	259.6	35.5
Sol C, $\alpha = 0\%$	2	35.5	176	4.96	0.1135	1046.7	3	500.7	18.4
	3	18.4	167	9.07	0.0690	636.3	2*	380.2	24.3
	4	24.3	170	7.00	0.0857	790.3	2	380.2	24.3
La Malbaie	1	18	166	9.22	0.0614	566.2	1	259.6	35.5
Sol C, $\alpha = 10\%$	2	35.5	176	4.96	0.1090	1005.2	2	380.2	24.3
	3	24.3	170	7.00	0.0949	875.2	2	380.2	24.3
Vancouver	1	18	166	9.22	0.0273	251.8	1	259.6	35.5
Sol C, $\alpha = 0\%$	2	35.5	176	4.96	0.0340	313.5	1	259.6	35.5
Vancouver	1	18	166	9.22	0.0166	153.1	1	259.6	35.5
Sol C, $\alpha = 10\%$	2	35.5	176	4.96	0.0316	291.4	1	259.6	35.5
Vancouver	1	18	166	9.22	0.1018	938.8	2	380.2	24.3
Sol E, $\alpha = 0\%$	2	24.3	170	7.00	0.0946	872.4	2	380.2	24.3

[Chopra 2006], on converge assez vite sans avoir besoin de forcer les itérations.

Cet exemple illustre l'efficacité de la méthode YPS qui n'a besoin que de très peu d'itération pour donner un dimensionnement préliminaire. Ce cas pratique met en relief l'effet du sol, de la rigidité post-élastique et de la situation géographique sur le dimensionnement sismique. On montre bien qu'un sol mou (sol de type E) est plus sensible aux risques sismiques qu'un sol très rigide (sol de type A). On retiendra aussi que la rigidité post-élastique réduit les efforts sismiques d'une structure lorsque cette dernière présente un comportement non-linéaire. Enfin on illustre que pour des structures assez rigides (pile de pont courte) les efforts sismiques à l'Est et à l'Ouest du continent Américain sont similaires, voire plus important à l'Est.

On souhaiterait terminer ce paragraphe en évaluant l'influence de la formule $R-\mu-T$ sur le dimensionnement. Pour les ponts des sols A et C de La Malbaie et celui du sol C de Vancouver et pour $\alpha = 0\%$, on recommence les étapes du paragraphe 6.3.2 en utilisant les formules de Nassar et Miranda. Les trois premières phases sont identiques. Les graphiques YPS calculés à l'étape 4 pour $\mu = 9.22$ vont changer en fonction de la formule $R-\mu-T$ choisie. On présente ces graphiques de dimensionnement à la figure 6.12. Les valeurs de \tilde{C}_y , F_e , P_c , M_c et ρ_t découlant des YPS de dimensionnement sont résumées au tableau 6.5.

On remarque certaines différences entre les valeurs de dimensionnement mais l'ordre de grandeur est sensiblement le même pour les trois formules $R-\mu-T$. Le pourcentage d'armature ne varie pas puisque ces colonnes sont dimensionnées avec l'armature minimale. La formule développée dans ce mémoire donne des forces de dimensionnement légèrement plus élevées pour le sol C à l'Est et à l'Ouest alors qu'elle minimise la force pour un sol A à l'Est. On illustre ainsi l'effet des différentes formules $R-\mu-T$ sur la méthode de dimensionnement YPS. On notera que les trois formules donnent des valeurs du même ordre de grandeur et que la formule développée dans ce mémoire a l'avantage d'avoir comme paramètres à la fois le type de sol, la rigidité post-élastique, la magnitude et le lieu géographique.

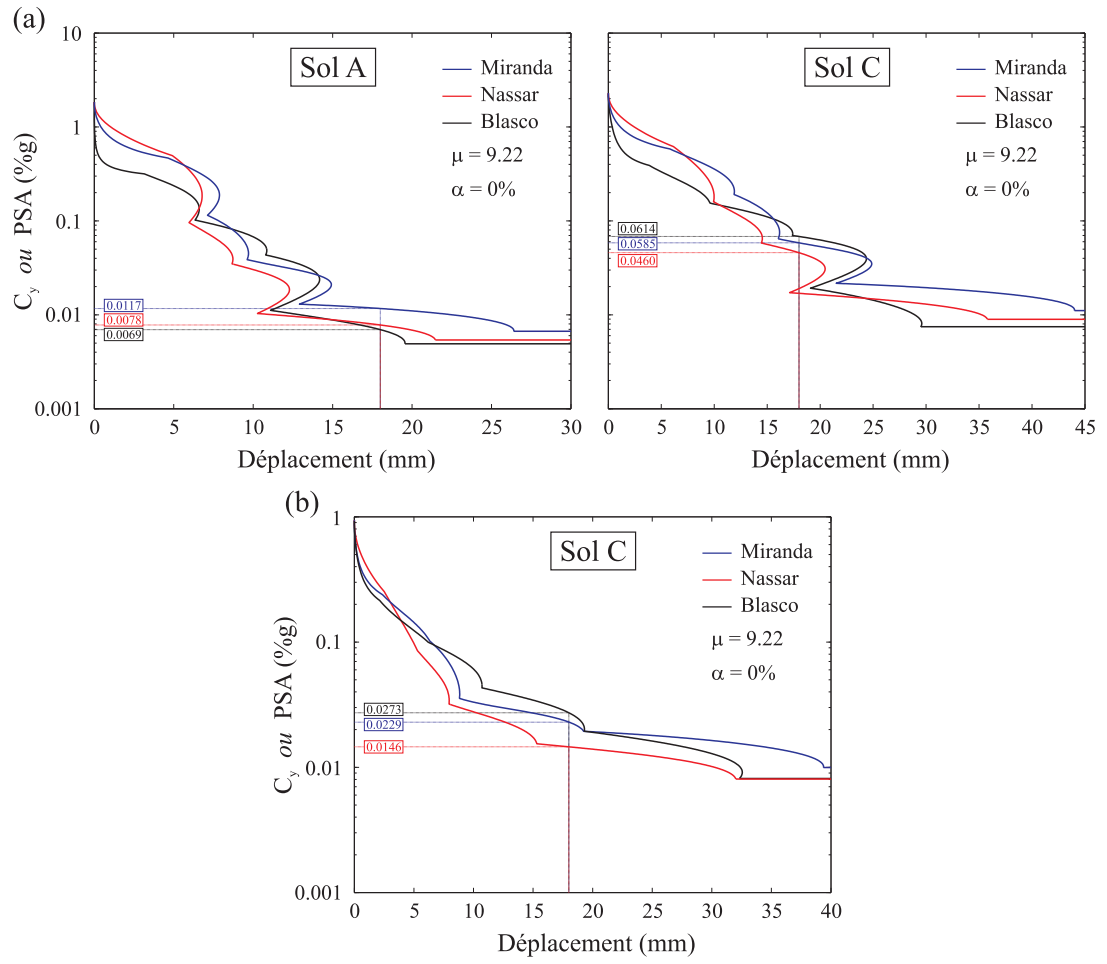


FIG. 6.12 : Comparaison des YPS de dimensionnement selon la formule $R\text{-}\mu\text{-}T$ choisie

Tableau 6.5 Valeurs de dimensionnement en fonction de la formule $R\text{-}\mu\text{-}T$ choisie.

	LA MALBAIE		VANCOUVER
	sol A, 0%	sol C, 0%	sol C, 0%
\tilde{C}_y : Miranda 1993	0.0117	0.0585	0.0229
\tilde{C}_y : Nassar 1991	0.0078	0.0460	0.0146
\tilde{C}_y : Nouvelle formule	0.0069	0.0614	0.0273
F_e (kN) : Miranda 1993	107.9	539.5	211.2
F_e (kN) : Nassar 1991	71.9	424.2	134.6
F_e (kN) : Nouvelle formule	63.6	629.9	251.8
P_c (MN) : Miranda 1993	3.129	3.349	3.182
P_c (MN) : Nassar 1991	3.111	3.290	3.143
P_c (MN) : Nouvelle formule	3.106	3.395	3.202
M_c (MN.m) : Miranda 1993	0.052	0.261	0.102
M_c (MN.m) : Nassar 1991	0.035	0.205	0.065
M_c (MN.m) : Nouvelle formule	0.031	0.304	0.122
ρ_t : Miranda 1993	0.01	0.01	0.01
ρ_t : Nassar 1991	0.01	0.01	0.01
ρ_t : Nouvelle formule	0.01	0.01	0.01

6.4 Autres applications

6.4.1 Outils de calculs

Une application directe de notre étude est l'élaboration d'outils informatiques permettant de calculer rapidement les spectres non-linéaires. La nouvelle version payante de BISPEC 2.0 et celle présentant des bugs de SEISMOSIGNAL 3.3.0 ont forcé l'élaboration d'outils "maison". Une première adaptation de RSPECTRUM a permis de développer un calculateur de spectre unidirectionnel pour une secousse. Cet outil, intitulé R1-SPECTRUM et présenté à la figure 6.13, offre de nombreux paramètres de calcul comme les périodes, les ductilités de calcul, la rigidité post-élastique, l'amortissement et des paramètres de convergence. Il calcule les spectres d'accélération relative, de vitesse relative, de déplacement relatif et le pseudo-spectre d'accélération absolue. Il permet de sortir aussi la ductilité calculée $\tilde{\mu}$, le coefficient de réduction force R , le nombre d'itération, le déplacement à la plastification u_y et le coefficient de plastification C_y . On pourra ainsi tracer directement les YPS exacts d'une secousse sismique.

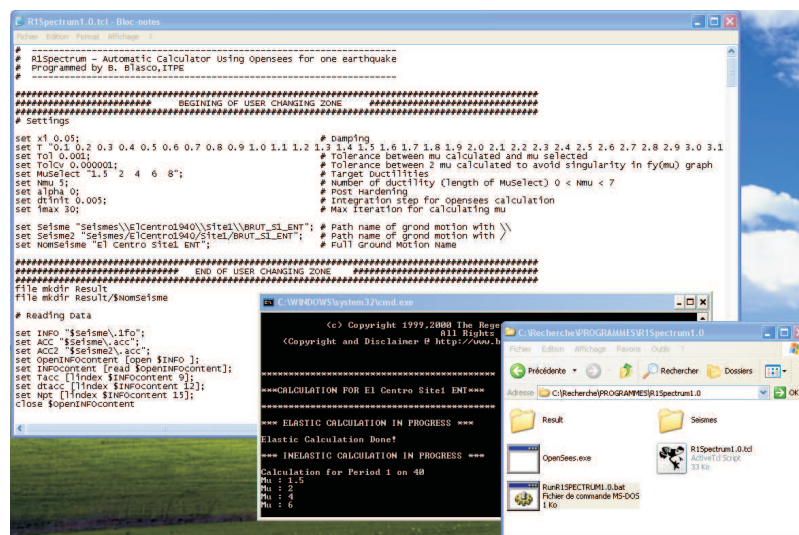


FIG. 6.13 : Capture d'écran de R1-SPECTRUM

L'autre programme développé pendant cette maîtrise et intitulé R1TRI-SPECTRUM cal-

cule des spectres radiaux tri-dimensionnels. La notion de spectre radial n'est pas encore très répandue dans la communauté scientifique. Le principe reste similaire à un spectre traditionnel à la différence que l'on s'intéresse aux maximums des accélérations, vitesses et déplacements radiaux. On obtient les variables radiales grâce aux relations :

$$\ddot{u}_r = \sqrt{\ddot{u}_x^2 + \ddot{u}_y^2 + \ddot{u}_z^2} \quad (6.40)$$

$$\dot{u}_r = \sqrt{\dot{u}_x^2 + \dot{u}_y^2 + \dot{u}_z^2} \quad (6.41)$$

$$u_r = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \quad (6.42)$$

où \ddot{u}_i , \dot{u}_i et u_i sont respectivement l'accélération, la vitesse et le déplacement dans la direction i pour une période donnée. Afin de tracer de tels spectres, il faut calculer la réponse temporelle d'un système oscillant à un degrés de liberté puis trouver les valeurs radiales maximales d'accélération, de vitesse et de déplacement. On peut étendre cette notion aux spectres inélastiques de réponse par le même procédé que celui présenté au paragraphe 2.6.2. On compare les spectres radiaux et unidirectionnels de la secousse d'Imperial Valley (IMP) à la figure 6.14.

Les méthodes de dimensionnement utilisant ce type de spectres débutent à peine. L'effet multi-directionnel des secousses sismiques est un aspect de la dynamique des structures encore mal appréhendé de nos jours. Ce domaine présente un potentiel de progrès important pour le dimensionnement sécuritaire et économique des structures.

6.4.2 Génération de spectres et accélérogrammes verticaux

Par le passé, on négligeait souvent les accélérations verticales lors du dimensionnement sismique d'une structure. Après les événements de Northridge en Californie (1994) et Kobe au Japon (1995) où l'on a enregistré les plus grandes accélérations verticales en zone urbaine de l'histoire, cette méthode de dimensionnement a été revue et corrigée. Les facteurs de sécurité actuellement appliqués dans les codes nationaux, comme le rapport d'amplitude vertical de $\frac{2}{3}$ font encore débat. Le développement des outils informatiques permet

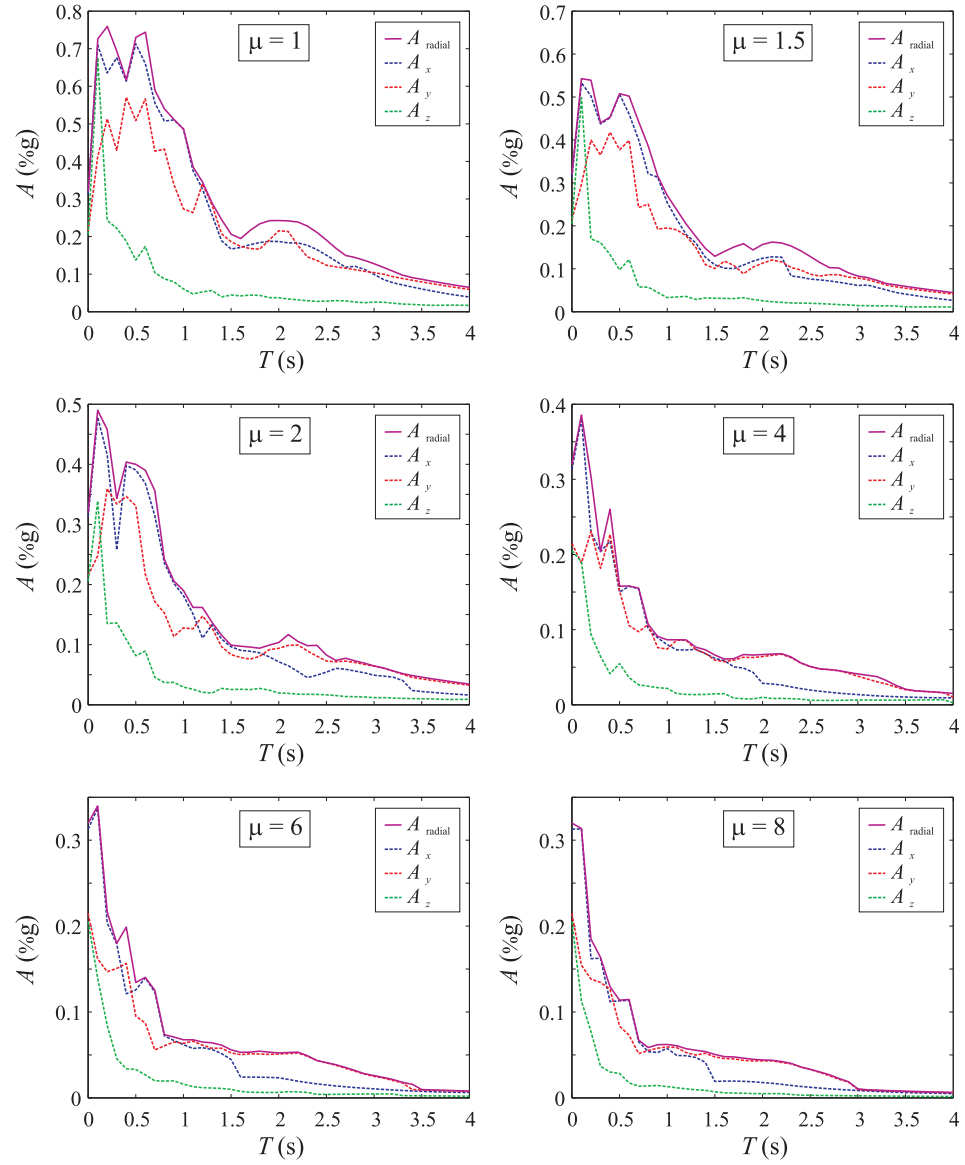


FIG. 6.14 : Comparaison des spectres radiaux et unidirectionnels du séisme IMP

aujourd'hui de calculer une structure soumise à des excitations multi-directionnelles si bien que certains ingénieurs insistent pour inclure des accélérations verticales dans leurs études sismiques. Puisqu'il manque foncièrement d'enregistrements verticaux historiques, une application importante de la recherche est la génération de spectres et d'accélérogrammes verticaux synthétiques.

Les résultats de cette maîtrise permettent d'évaluer les méthodes de génération de signaux verticaux. Celle présentée dans ce paragraphe a été développée par Wanitkorkul et Filiatrault [2005] et consiste à utiliser un spectre horizontal artificiel pour créer premièrement un spectre vertical, et ensuite simuler un accélérogramme compatible avec ce spectre.

6.4.2.1 Génération du spectre de réponse vertical

Le spectre vertical "cible" est calculé à partir du spectre horizontal en utilisant la technique de déplacement et de réduction proposée par Bozorgnia et al. [Bozorgnia et al. 1995 et Bozorgnia et al. 1996] récemment calibrée par Christopoulos et al. [Christopoulos et al. 2003]. Cette technique utilise deux facteurs S_f et R_f qui modifient le spectre horizontal pour obtenir le spectre vertical "cible". Le facteur de périodes S_f modifie le contenu fréquentiel du spectre alors que le facteur de réduction R_f réduit son amplitude afin de correspondre aux rapports d'amplitude observés pour les secousses historiques (figure 6.15)

Les études statistiques de Christopoulos [Christopoulos 1998] donnent des valeurs de S_f et R_f dépendant du ratio PGA/PGV. Les valeurs du PGA doivent être exprimées en g et celles du PGV en m/s. Selon ces mêmes études, le ratio PGA/PGV de l'Est est plus grand que celui de l'Ouest, ce qui confirme les observations de ce mémoire sur le haut contenu fréquentiel des séismes de l'Est. D'autres études statistiques de Christopoulos [Christopoulos et al. 2003] permettent de calculer les facteurs S_f et R_f en fonction de la distance épacentrale. Une corrélation existe entre la distance épacentrale, le site géographique et le ratio PGA/PGV ce qui permet de construire le tableau récapitulatif 6.6.

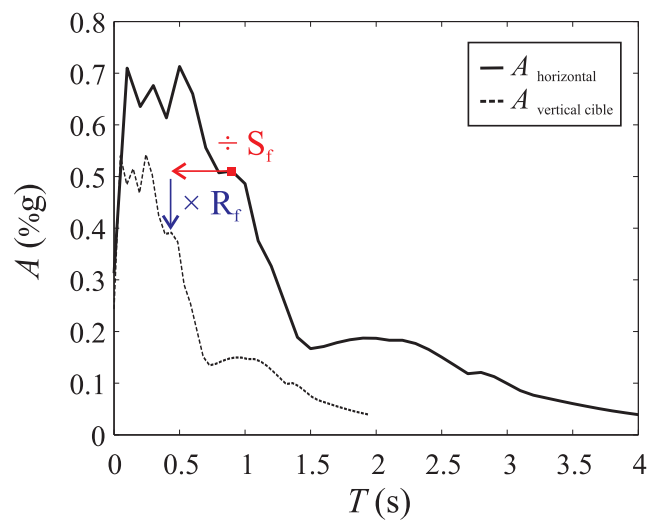


FIG. 6.15 : Principe de réduction et de décalage du spectre horizontal pour calculer le spectre vertical "cible"

Tableau 6.6 Tableau récapitulatif des valeurs de S_f et R_f .

Distance épicentrale	Ratio PGA/PGV	Région géographique	S_f	R_f
≤ 30 km	$\text{PGA/PGV} \geq 1.2$	Est	1.55	0.8
> 30 km	$0.8 < \text{PGA/PGV} < 1.2$	Ouest	1.6	0.55
	$\text{PGA/PGV} \leq 0.8$		1.45	0.55

Dans cet exemple, les valeurs S_f et R_f sont calculées tout d'abord à l'aide de la distance épacentrale puis en fonction du ratio PGA/PGV. De manière générale les résultats sont identiques, en cas de conflit, les valeurs les plus conservatrices sont adoptées, c'est à dire R_f maximal et S_f minimal. On présente les résultats des spectres horizontaux cibles pour les séismes NAH1 et IMP à la figure 6.17.

6.4.2.2 Procédure de simulation de l'accélérogramme compatible avec le spectre généré

Une fois le spectre vertical "cible" calculé, on utilise le logiciel RSCTH (Response Spectrum Compatible Time Histories) développé par le Engineering Seismology Laboratory (ESL) de l'université de Buffalo, pour générer un accélérogramme compatible avec le spectre. Ce logiciel¹ implémente la méthode développée par Deodatis [Deodatis 1996] qui utilise un schéma itératif pour la génération des accélérations verticales.

Après la simulation de l'accélérogramme vertical, on vérifie que les composantes horizontales et celle verticale sont corrélées de façon vraisemblable. On utilise la relation suivante pour évaluer le facteur de corrélation $\theta_{(\vec{H}, \vec{V})}$ entre l'accélérogramme vertical et celui horizontal :

$$\theta_{(\vec{H}, \vec{V})} = \frac{\vec{H} \cdot \vec{V}}{|\vec{H}| \cdot |\vec{V}|} \quad (6.43)$$

où \vec{H} et \vec{V} sont respectivement un des deux accélérogrammes horizontaux et l'accélérogramme vertical simulé. Les facteurs de corrélation moyens obtenus par Christopoulos [Christopoulos et al. 2003] basés sur des observations statistiques des séismes de l'Ouest sont présentés dans le tableau 6.7.

Lors de la simulation de l'accélérogramme vertical, si le facteur de corrélation dépasse de plus de 30% les valeurs moyennes du tableau 6.7, on procède à des permutations circulaires

¹ téléchargeable à l'adresse <http://civil.eng.buffalo.edu/EngSeisLab/products.htm>

Tableau 6.7 Facteur de corrélation moyens obtenus par Christopoulos.

Distance épacentrale	$\theta_{(\vec{H}, \vec{V})}$
≤ 30 km	0.25
> 30 km	0.12

sur le vecteur d'accélération simulé jusqu'à ce que le facteur de corrélation atteigne une valeur acceptable. On résume à la figure 6.16 la procédure complète de génération de spectres et accélérogrammes verticaux.

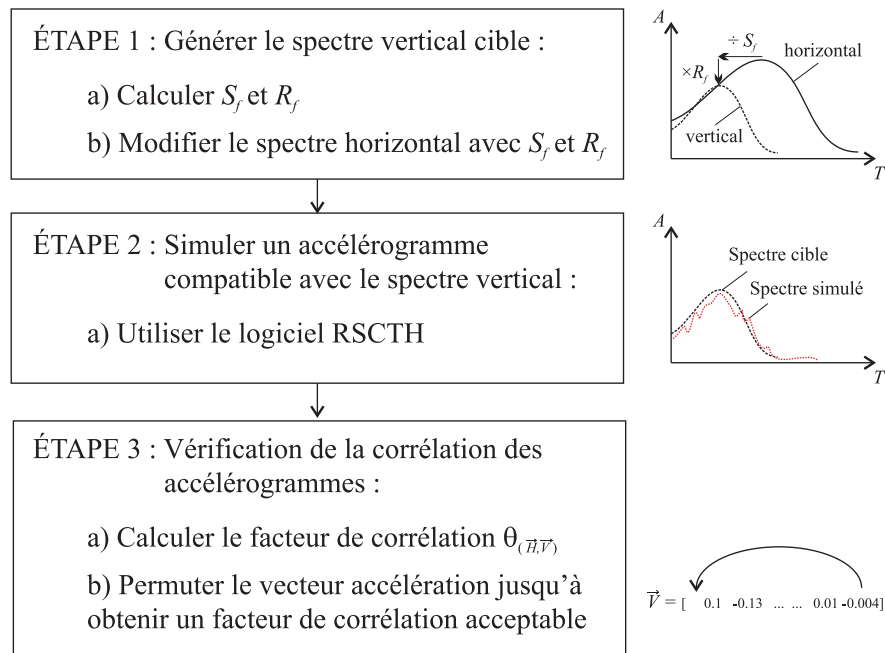


FIG. 6.16 : Récapitulatif de la procédure de génération de spectres et accélérogrammes verticaux

6.4.2.3 Quelques résultats et commentaires

La méthode de génération de données sismiques verticales que l'on vient de présenter est utilisée sur des séismes historiques afin de comparer les données générées aux données réelles. Cette maîtrise permet une telle étude puisque tous les spectres verticaux ont été calculés. De plus, elle peut servir de base pour une validation de la dite méthode pour le contexte sismique du Nord-Est américain. On présente les spectres cibles, simulés et réels des séismes NAH1 et IMP à la figure 6.17 et les accélérogrammes simulés puis permutés et réels à la figure 6.18.

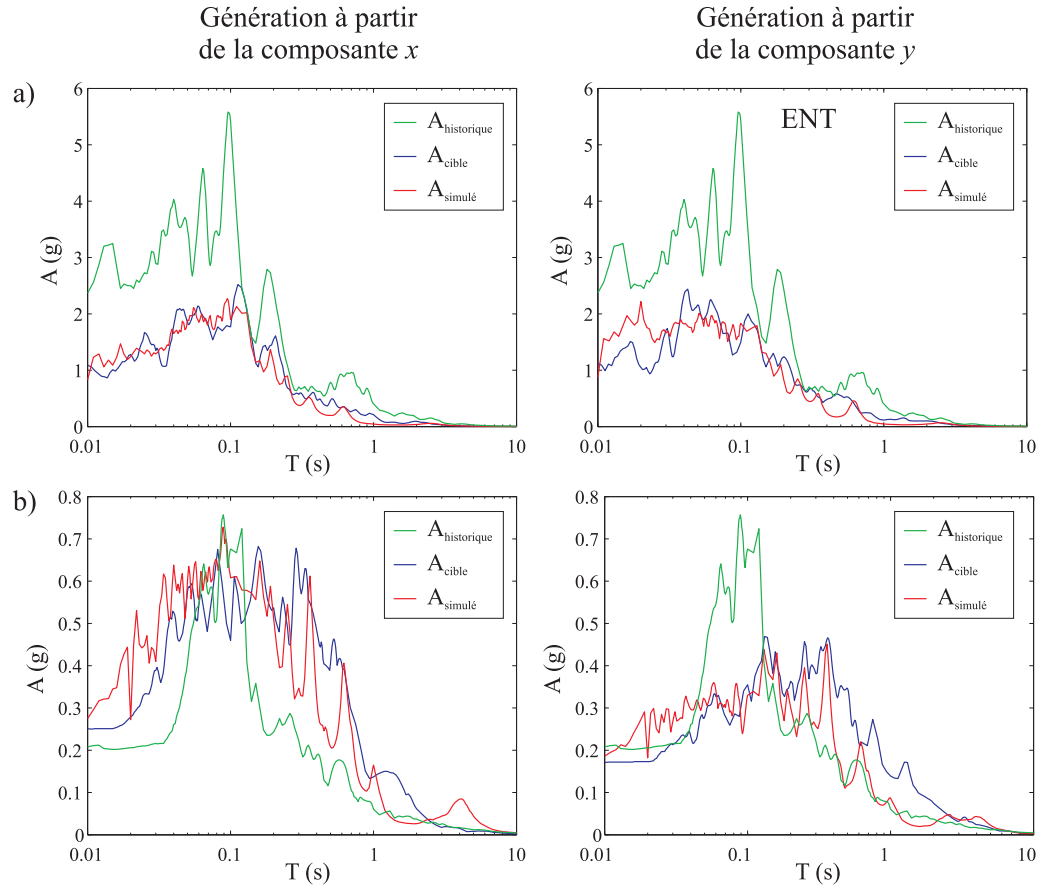


FIG. 6.17 : Spectres verticaux cibles, simulés et réels des séismes NAH1 (a) et IMP (b)

On remarque que le contenu fréquentiel des données verticales historiques et simulées sont

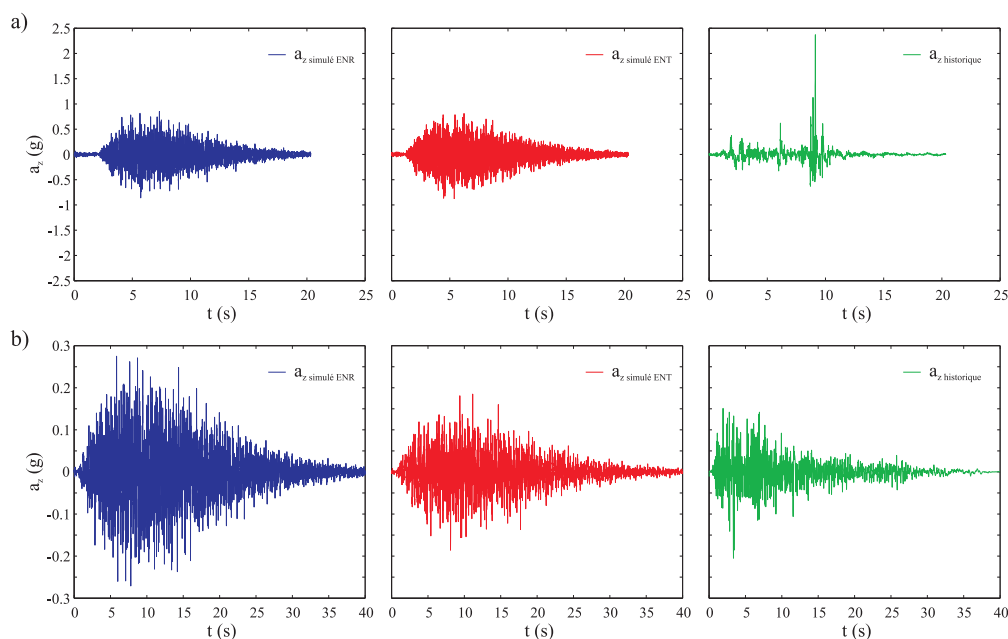


FIG. 6.18 : Accélérogrammes verticaux simulés puis permutés et réels des séismes NAH1 (a) et IMP (b)

similaires aussi bien à l'Est qu'à l'Ouest. Par contre, les amplitudes des signaux simulés sont en général plus faibles que la réalité. Des valeurs de R_f plus élevées semblent plus adéquate pour l'Est. Des analyses approfondies sont cependant requises pour mieux cerner cette problématique notamment pour les séismes de l'Est Canadien.

6.4.3 Effet des secousses multi-directionnelles

Les résultats des rapports d'amplitude des chapitres 3 et 4 permettent une évaluation qualitative de la méthode traditionnelle déterminant les effets des secousses multi-directionnelles [López et al. 2006]. Dans les codes de dimensionnement, l'analyse des effets de deux séismes horizontaux est souvent combinée par des règles spécifiques comme celle du SRSS, du 30 ou 40%. Ces règles ont été élaborées pour minimiser l'erreur de la réponse maximale combinée, sous l'hypothèse que les deux composantes horizontales d'accélération soient décorrélées et d'égale intensité [Rosenblueth et Contreras 1977, Newmark

1975].

On nomme r_x et r_y les deux réponses maximales dans les directions x et y . Les règles de combinaison, déjà citées, estiment la réponse maximale globale r en additionnant les réponses statistiquement indépendantes r_x et r_y qui surviennent à des moments différents. Les valeurs de 0.30 ou 0.40 des règles du 30 ou 40% découlent d'une régression linéaire qui approxime la valeur r avec une probabilité de dépassement similaire à r_x et r_y . L'hypothèse d'intensité égale des composantes horizontales est conservative puisque les rapports d'amplitude obtenus sont principalement inférieurs à 1. La règle des 30% a aussi été prouvée pour des composantes décorrélées ayant un rapport d'amplitude de 0.85 [Clough et Penzien 1993].

Après avoir étudié les rapports d'amplitude, on remarque qu'une valeur constante de 0.85 correspond plus ou moins à la réalité. On a observé des variations importantes des rapports d'amplitude selon les périodes, la géographie ou le couple (M, R). On rappelle que l'on trouve pour l'Est un rapport d'amplitude médian de 0.95 et pour l'Ouest de 0.74. Afin de préciser les calculs de combinaison des réponses maximales, il est plus précis d'adopter des rapports d'amplitude dépendant de la période de vibration de chaque direction pour combiner la réponse totale. Une méthode utilisant la moyenne du rapport d'amplitude maximal et minimal sur l'ensemble des périodes a été proposée par López [López et al. 2004]. En utilisant les résultats de cette maîtrise, cette méthode donne un rapport d'amplitude constant de 0.9 pour l'Est et de 0.85 pour l'Ouest.

En ce qui concerne le rapport d'amplitude vertical, on utilise fréquemment dans des études sur les mouvements sismiques horizontaux et verticaux la valeur de 0.67. Dans ce mémoire, on observe les mêmes tendances que López [López et al. 2006]. Le rapport d'amplitude vertical médian varie entre 0.25 à 0.8 pour l'Ouest et entre 0.7 et 1.2 pour l'Est dépendant de la période de vibration. On remarque aussi une variation du rapport d'amplitude vertical selon la distance épacentrale : plus cette distance est faible, plus le rapport d'amplitude vertical est important en basses périodes. On retiendra pour finir, que le rapport d'amplitude vertical moyen à l'Est est supérieur à celui usuellement utilisé

dans les études spécialisées (0.8 contre 0.67) alors qu'à l'Ouest ce rapport γ est largement inférieur (0.33 contre 0.67). La valeur de 0.67 conviendrait pour des structures de l'Ouest mais semble être non-sécuritaire pour des structures rigides (faible période) de l'Est du continent Nord-Américain.

6.5 Conclusion

Avec ce chapitre, on a illustré quelques possibles utilisations pour l'ingénieur des travaux de recherche développés dans ce mémoire. On a vu tout d'abord que notre base de données spectrale calculée à l'aide de RSPECTRUM permettait de construire des spectres de plastification (YPS). On a ensuite étendu la notion de YPS à celle de spectre de plastification "approximé" ou "lissé" calculé à partir des spectres de dimensionnement du CNBC. En utilisant les formules $R-\mu-T$, on a pu ainsi construire des YPS "approximés" inélastiques.

Dans un autre paragraphe, on a présenté une méthode de dimensionnement performant utilisant les YPS "approximés" inélastiques. Cette méthode consiste à évaluer le déplacement plastique et ultime de la structure, d'en déduire la demande en ductilité nécessaire puis de trouver le coefficient de force plastique \tilde{C}_y à l'aide d'un YPS "approximé" inélastique calculé pour la dite ductilité. On trouve ainsi un cisaillement à la base, qui dans le cas d'une pile de pont est directement applicable comme une force sismique latérale équivalente.

Afin d'illustrer cette méthode, on a effectué le dimensionnement préliminaire d'une pile de pont à La Malbaie et à Vancouver sur plusieurs types de sols, pour plusieurs rigidités post-élastique et en utilisant différentes formules $R-\mu-T$. On remarque, sans surprise, que les sols mous présentent des efforts sismiques plus importants que les sols plus rigides. La rigidité post-élastique offre une amélioration du comportement non-linéaire en réduisant légèrement les efforts sismiques. On note que pour une structure rigide (pile assez courte) les efforts sismiques sont un peu plus élevés à l'Est qu'à l'Ouest. On a montré qu'il n'existait pas de différences significatives entre les méthodes de dimensionnements utilisant les formules $R-\mu-T$ de la littérature et celle développée dans ce mémoire. Cette dernière re-

marque permet de valider la formule développée dans ce mémoire et de souligner que l'on a adapté une méthode de dimensionnement qui prend en considération le type de sol, la rigidité post-élastique, la magnitude et la situation géographique.

On a aussi présenté deux programmes de calcul de spectre utilisant OPENSEES, l'un calculant les spectres unidirectionnels intitulé R1-SPECTRUM et l'autre calculant les spectres radiaux 3D intitulé R1TRI-SPECTRUM. Le spectre radial 3D est encore en étude mais semble offrir un réel potentiel pour le dimensionnement performant.

On a exposé un principe de génération de spectre vertical artificiel utilisant des spectres horizontaux et les rapports d'amplitude verticaux. Les résultats de cette maîtrise permettent de valider et d'adapter cette méthode pour le contexte du Nord-Est américain.

Enfin on a débattu de la règle du 30% pour évaluer les effets bidirectionnels. Il semble que cette règle soit un peu simpliste et qu'elle devrait être réévaluer pour les rapports d'amplitude de spectre trouvés pour l'Est dans la présente étude.

CHAPITRE 7

CONCLUSIONS

7.1 Introduction

La présente étude sur la caractérisation des secousses sismiques du continent Nord Américain a permis de dégager de nombreuses caractéristiques et applications utiles en génie parasismique. Les différences sismiques entre l'Est et l'Ouest de l'Amérique du Nord sont suffisamment importantes pour être considérées à la fois dans les codes de construction et dans les études de caractérisation du comportement sismique (spectres de dimensionnement, accélérogrammes artificiels, effet bidirectionnel, relation $R-\mu-T$, dimensionnement performant, etc.).

On récapitule dans ce dernier chapitre les principaux résultats et observations de cette maîtrise. On regroupe ces conclusions dans les cinq paragraphes suivants :

7.2 Des outils de calcul performants et modulables

Cette maîtrise a permis de mettre au point des outils de calcul de spectre modulables utilisant des programmes de structure du marché (ADINA, RUAUMOKO ou OPENSEES). Le principe de ces outils de calcul est de définir des systèmes à un degrés de liberté ayant des périodes correspondant aux périodes de calcul du spectre puis de lancer, à l'aide d'un "batch", une analyse structurale avec des logiciels disponibles. En ne retenant que les valeurs maximales des réponses dynamiques, on peut construire les spectres de déplacement, de vitesse et d'accélération. L'avantage de cette procédure, c'est qu'elle peut être automatisée pour une large base de données d'accélérogrammes et qu'elle peut utiliser toutes les spécificités des programmes de structure.

Pour le calcul des spectres non-linéaires, il a fallu ajouter à la procédure de calcul un algorithme de convergence vers la ductilité fixée. Utilisant l'hypothèse d'une relation affine

entre les variables $\log(\mu)$ et $-\log(\bar{f}_y)$, ce mémoire dévoile un algorithme performant pour trouver le plateau de plastification correspondant à la ductilité choisie.

Ces outils ont été validés à chaque étape, à l'aide de logiciels spécialisés pour le calcul de spectre (SEISMOSIGNAL, BISPEC et/ou USEE). Les meilleures performances pour le calcul ont été obtenues avec le langage TCL&TK et le logiciel de structure OPENSEES. Les programmes intitulés "RSPECTRUM" et "RSPECTRUM avec le module *RNonLin*" calculent respectivement les spectres élastiques et inélastiques pour une large base de données. Les programmes "R1-SPECTRUM" et "R1TRI-SPECTRUM", quant à eux, calculent les spectres élastiques et inélastiques d'un signal 1D ou 3D respectivement et permettent de modifier de nombreux paramètres (périodes, ductilités de calcul, rigidité post-élastique, amortissement et paramètres de convergence).

7.3 Caractérisation des spectres élastiques et inélastiques

La base de données sismiques utilisée pour la caractérisation des spectres élastiques et inélastiques est actuellement constituée de 27 séismes historiques (22 pour l'Est et 5 pour l'Ouest), 48 accélérogrammes synthétiques générés en 1999 (28 pour l'Est et 20 pour l'Ouest) et 480 séismes synthétiques générés en 2009 (240 pour l'Est et pour l'Ouest, uniquement utilisés pour les relations $R-\mu-T$) [Atkinson et Beresnev 1998, Atkinson 2009]. Il faut ajouter à ces séismes tous les signaux décorrélés découlant de ces enregistrements. Pour les données synthétiques de 1999, on a combiné deux à deux les accélérogrammes d'un même site afin de générer artificiellement un séisme 2D.

Une première étape dans la caractérisation des spectres a été la quantification de l'effet de la décorrélation grâce à des paramètres physiques. Pour les données élastiques comme inélastiques, ce processus stochastique a tendance à séparer les spectres horizontaux et à réduire le spectre vertical. On a montré aussi que le repère principal, commun à tous les séismes, amplifiait les écarts d'amplitude entre les composantes, n'avait pas d'effet sur le contenu fréquentiel et n'avait pas de direction majeure privilégiée.

Les études sur les spectres élastiques et inélastiques moyens de l'Est et de l'Ouest ont démontré que les secousses de l'Est présentaient un contenu fréquentiel bien plus élevé que celles de l'Ouest. Les valeurs spectrales significatives pour l'Est sont concentrées entre 0.01 s et 1 s alors qu'à l'Ouest ces valeurs se retrouvent entre 0.1 s et 6 s. On a démontré aussi qu'à l'Est le spectre vertical est généralement plus élevé qu'à l'Ouest. La demande en ductilité réduit uniquement l'amplitude du spectre d'accélération sans modifier énormément le contenu fréquentiel.

Afin de caractériser les amplitudes relatives des directions horizontales et verticales, on s'est intéressé aux rapports d'amplitude des spectres élastiques horizontaux (RASEH), élastiques verticaux (RASEV), inélastiques horizontaux (RASIH) et inélastiques verticaux (RASIV). On a tout d'abord illustré la variabilité des rapports d'amplitude en fonction de la période. On a montré ensuite que les séismes historiques donnaient des rapports plus faibles et plus variables que les secousses synthétiques. On a ainsi prouvé que les données synthétiques étaient moins corrélées que celles de la nature mais pas tout à fait décorréliées. Le contexte géographique a aussi une influence forte sur les rapports d'amplitude. L'Est présente des rapports horizontaux légèrement plus élevés qu'à l'Ouest (RASEH historiques : 0.95 à l'Est contre 0.74 à l'Ouest) et des rapports verticaux nettement plus grand qu'à l'Ouest (RASEV historiques : 0.80 contre 0.33). La demande en ductilité a un effet presque nul sur ces rapports.

7.4 Facteur de réduction de force

La présente étude a permis de générer une base de données des facteurs de réduction de force R . Elle a montré que ce paramètre variait plus vite à l'Est en fonction de la période, qu'il présentait un palier oscillant autour de la ductilité, une bosse post-palier puis un trou et tendait enfin vers la valeur de la ductilité. On a remarqué que la bosse était plus importante à l'Ouest alors que le trou se retrouvait presque uniquement pour les données de l'Est.

En s'aidant des graphiques R - μ - T moyens de la base de données, on a développé une

formule empirique prenant en compte les différences entre l'Est et l'Ouest qui pourrait inspirer le code canadien pour le dimensionnement performant des structures. Cette formule se résume en :

$$R^{(\mu)}(T) = f(\mu - 1) + 1 + P(\mu, T) + H(\mu, T) \quad (7.1)$$

avec $f(\mu, T)$ la fonction permettant d'obtenir la forme générale d'un graphique R - μ - T et valant :

$$f(\mu, T) = \frac{10^{\kappa(\mu, T)}}{1 + 10^{\kappa(\mu, T)}} \quad \text{et} \quad \kappa(\mu, T) = p(\mu) \log_{10}(T) + q(\mu) \quad (7.2)$$

Et P et H les fonctions permettant de prendre en compte la bosse post-oscillation et l'effet de trou :

$$P(\mu, T) = a_1(\mu) e^{-a_2(\mu)(\log_{10}(T) + a_3(\mu))^2} \quad (7.3)$$

$$H(\mu, T) = b_1(\mu) e^{-b_2(\mu)(\log_{10}(T) + b_3(\mu))^2} \quad (7.4)$$

p , q , a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 et b_3 étant des fonctions d'interpolation en fonction de la ductilités détaillées dans le mémoire.

On a généralisé cette formule en ajoutant les paramètres de type de sol, de rigidité post-élastique et de magnitude. La nouvelle formule ne change pas, seul les fonctions p , q , a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 et b_3 dépendent à présent de μ , α , S , M_w et G . Ces interpolations sont détaillées dans le mémoire et calculables à l'aide d'utilitaires informatiques développés dans le cadre de ce projet.

7.5 Synthèse des résultats et applications

Le mémoire démontre la grande différence entre la sismicité de l'Est et de l'Ouest du continent Nord Américain. Bien que les particularités de l'Est soient parfois prises en compte dans les normes de dimensionnement (spectre de dimensionnement, coefficients

des méthodes simplifiées, etc.), les recherches actuelles se basent presque toujours sur des données sismiques provenant de l'Ouest. Il est vrai que le manque de données historiques à l'Est rend certains travaux plus difficiles. Ce mémoire a caractérisé les spectres de l'Est et permet donc de recalibrer certaines recherches et méthodes de dimensionnement.

On a illustré quelques possibles utilisations pour l'ingénieur des travaux de recherche développés dans ce mémoire. On a montré que la base de données spectrale calculée à l'aide de RSPECTRUM permettait de construire des spectres de plastification (YPS). On a également utilisé les nouvelles formules $R-\mu-T$ pour construire des YPS "approximés" inélastiques à partir des spectres de dimensionnement du CNB 2005.

Une méthode de dimensionnement performant a ensuite été illustrée en utilisant les YPS "approximés" inélastiques. Cette méthode consiste à évaluer le déplacement plastique et ultime de la structure, d'en déduire la demande en ductilité nécessaire puis de trouver le coefficient de force plastique \tilde{C}_y à l'aide d'un YPS "approximé" inélastique calculé pour la dite ductilité. On trouve ainsi un cisaillement à la base, qui dans le cas d'une pile de pont est directement applicable comme une force sismique latérale équivalente.

Pour valider cette méthode, on a effectué le dimensionnement préliminaire d'une pile de pont à La Malbaie et à Vancouver sur plusieurs types de sols, pour plusieurs rigidités post-élastique et en utilisant différentes formules $R-\mu-T$. On a remarqué, sans surprise, que les sols mous présentaient des efforts sismiques plus importants que les sols plus rigides et que la rigidité post-élastique offrait une amélioration du comportement non-linéaire en réduisant légèrement les efforts sismiques. On a noté que pour une structure rigide les efforts sismiques sont un peu plus élevés à l'Est qu'à l'Ouest. On a montré qu'il n'existait pas de différences significatives entre les méthodes de dimensionnements utilisant les formules $R-\mu-T$ de la littérature et celle développée dans ce mémoire mais qu'avec cette dernière formule on pouvait prendre en compte les effets du sol, de la rigidité post-élastique, de la magnitude et de la situation géographique.

Les outils de calculs développés dans ce mémoire peuvent servir à de nombreux champs de

recherche. On a montré que le spectre radial 3D pouvait être calculé à l'aide de "R1TRI-SPECTRUM". Ce domaine de recherche semble offrir un réel potentiel pour le dimensionnement performant.

Les résultats de cette maîtrise permettent de valider et d'adapter des méthodes de génération de spectre vertical artificiel utilisant des spectres horizontaux et les rapports d'amplitude verticaux pour le contexte du Nord-Est Américain. Ils permettent aussi de débattre de la règle du 30% pour évaluer les effets bidirectionnels des secousses sismiques. Il semblerait que cette règle soit un peu simpliste et qu'elle devrait être réévaluer pour les rapports d'amplitude de spectre trouvés pour l'Est dans la présente étude.

7.6 Perspectives de recherche

Les perspectives de recherche motivées par ce présent travail sont multiples :

- Une étude sur une base de données historique plus large pourrait valider les caractérisations trouvées dans ce mémoire.
- L'étude des spectres radiaux (2D ou 3D) offre un grand potentiel pour le développement de méthodes de dimensionnement et d'évaluation de la performance sismique tenant compte des effets 3D.
- Des relations $R-\mu-T$ pourraient être développées pour les spectres radiaux.
- Les méthodes de génération de spectres verticaux pourraient être calibrées et adaptées au contexte Nord-Est Américain.
- Une règle plus précise permettant d'évaluer les effets bidirectionnels pourrait être développée en considérant les rapports d'amplitude calculés dans ce présent mémoire.
- La méthode de dimensionnement performant utilisant les YPS pourrait être validée pour des structures ayant plusieurs degrés de liberté.

RÉFÉRENCES

- ADAMS, J., BASHAM, P. (1989). The Seismicity and Seismotectonics of Canada East of Cordillera. *Geoscience Canada*, Volume 16, Number 1, 3-16.
- ADINA 8.5. (2006). *Theory and Modeling Guide*, ADINA R&D Inc.
- ANTONIOU, S., Pinho, R. 2003. SeismoSignal, disponible sur le lien : <http://www.seismosoft.com>.
- ARIAS, A. (1970). A measure of earthquake intensity. *Seismic Design for Nuclear Power Plants* de R.J. Hansen, MIT Press, Cambridge, Massachussetts, 438–483.
- ATKINSON, G.M., BERESNEV, I.A. (1998). Compatible ground-motion time histories for new national seismic hazard maps. *Revue Canadienne de Génie Civil*, 25, 305–318.
- ATKINSON, G.M. (2009). Earthquake time histories compatible with the 2005 NBCC uniform hazard spectrum, *Revue Canadienne de Génie Civil*, 36(6) : 991–1000.
- BLACK, E. (2000). *Seismic design and evaluation of multistory buldings using yield point spectra*, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2000, Urbana.
- BOUAANANI, N. (2005). *Utilitaire pour le calcul des spectres sismiques*, Département des génies Civils, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, Montréal.
- BOUAANANI, N., ALEXIEVA, K. (2006). Displacement-based seismic design of shear walls submitted to eastern Canada seismic hazard. Paper ST-099, 1st International Structural Specialty Conference – Canadian Society of Civil Engineering, Calgary, May 23-26.
- BOZORGNI, Y., NIAZI, M., CAMPBELL, K.W. (1995). Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake. *Earthquake Spectra*, 11(4), 515-525.
- BOZORGNI, Y., NIAZI, M., CAMPBELL, K.W. (1996). Relationship between vertical and horizontal response spectra for the Northridge earthquake. *11th World Conference on Earthquake Engineering*, Mexico, paper n° 893.

- CARR, A. (2002). *RUAUMOKO, The maori god of volcanoes and earthquakes, 2-Dimensional Version*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- CAC, Cement Association of Canada, Association Canadienne du Ciment (2006). *Concrete Design Handbook*, 3^e édition, 983 p.
- CEN, Centre Européen de Normalisation. (2003). *Eurocode 8 - 2 : Design provisions for earthquake resistance of structures*, Part 2, Bridges, 2003.
- CHOPRA, A.K. (2006). *Dynamics of structures theory and applications to earthquake engineering*, 3^e édition, 876 p.
- CLOUGH, R.W., PENZIEN, J. (1993). *Dynamics of structures*, Second Edition, McGraw-Hill, Inc.
- CHRISTOPOULOS, C. (1998). *A study of the characteristics of vertical accelerations and their effects on civil engineering structures*, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, 197 p.
- CHRISTOPOULOS, C., LEGER, P., FILIATRAULT, A. (2003). Sliding response of gravity dams including vertical seismic acceleration. *Earthquake engineering and engineering vibration*, 2, 189-200.
- CNBC (2005). *Code national du bâtiment Canadien*, Canada 2005.
- CRESTEL, B. (2007). *Réponse sismique des câbles de ponts haubanés de petites et moyennes portées : Effets d'échelle et de l'angle d'incidence des séismes*, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, 156 p.
- CRESTEL, B., BOUAANANI, N. (2006). *Multicomponent response spectra of Eastern North America earthquakes. Conférence annuelle de la Société Sismologique d'Amérique - Section de l'Est*, Ottawa, Ontario, Canada. Octobre 2006.
- DAVIDOVICI, V. (1999). *Construction en zone sismique*, édition Le Moniteur, 330 p.
- DEODATIS, G. (1996). Non-stationary stochastic vector processes : Seismic Ground motion applications. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 11, 149-167.
- FARROW, K.T. (2001). *Capacity-Demand Index Relationships for Performance-Based Seismic Design*, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana, 291 p.

- FILIATRAULT, A. (1996). *Élément de génie parasismique et de calcul dynamique des structures*, École Polytechnique de Montréal, Montréal, 2^e édition, 478 p.
- FUENTES, A. (1996). *Bâtiments en zone sismique*, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 218 p.
- GRASSO, J.R. (1993). *Fluides et instabilités sismiques : implications pour le comportement mécanique de la croûte supérieure = Fluid induced seismic instabilities : implication for the mechanical behavior of the uppercrust*, INIST-CNRS, Cote INIST : TD 20811.
- GREIG, G.L., ATKINSON, G.M. (1993). The damage potential of Eastern North American earthquakes. *Seismological Research Letters*, 64-2, 119-137.
- GUPTA, H.K. (1997). Enhanced reservoir-induced earthquakes in Koyna region, India, during 1993–95. *Journal of Seismology*, Volume 1, Number 1, 47-53.
- INEL, M., et al. (2001). *USEE 2001 : Utility Software for Earthquake Engineering, Report and User's Manual*, Mid America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, October 2001.
- KOLIAS, B. (2007). *Eurocode 8 : Part 2. Seismic design of bridges*.
- KRASIMIRA, A. (2007). *Displacement-based performance assessment of RC shear walls designed according to Canadian seismic standards*, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, 289 p.
- LÉGER, P. (2008). *Notes de cours d'Analyse Dynamique des Structures (CIV 6508)*, École Polytechnique de Montréal, Département des génies Civil, Géologique et des Mines, Montréal.
- LÓPEZ, O.A., CHOPRA, A.K., HERNANDEZ, J.J. (2000). Critical response of structures to multicomponent earthquake excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 1759-1778.
- LÓPEZ, O.A., CHOPRA, A.K., HERNANDEZ, J.J. (2001). Evaluation of combination rules for maximum response calculation in multicomponent seismic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 1279-1298.

- LÓPEZ, O.A., CHOPRA, A.K., HERNANDEZ, J.J. (2004). Adapting the CQC3 rule for three seismic components with different spectra. *Journal of Structural Engineering*, 130 (3), 403-410.
- LÓPEZ, O.A., HERNANDEZ, J.J., BONILLA, R. (2006). Response spectra for multi-component structural analysis. *Earthquake Spectra*, 22-1, 85-113.
- MARTIN AND ASSOCIATES, Inc. (2009). The Loma Prieta Earthquake. http://www.johnmartin.com/earthquakes/eqshow/647012_05.htm, Consulté le 10 Novembre 2009.
- MATLAB 7.5.0, R2007b (2007). *MATLAB & SIMULINK, Release notes*, The Math-Works, Inc.
- MIRANDA, E., (1993). Site-Dependent Strength-Reduction Factors, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, 119, 3503-3519.
- McKenna, F., Fenves, G.L., Scott, M.H. (2000). Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees). Univ. of California, Berkeley, CA, <http://opensees.berkeley.edu>.
- NASSAR, A.A., KRAWINKLER, H. (1991). *Seismic Demands for SDOF and MDOF systems*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, 220 p.
- NEWMARK, N.M. (1975). Seismic design criteria for structures and facilities, trans-Alaska pipeline system, *Proceedings, US National Conference on Earthquake Engineering*, Earthquake Engineering Research Institute, p 94-103.
- PAULTRE, P. (2005). *Dynamique des structures (application aux ouvrages de génie civil)*, Hermès Science, Paris, 702 p.
- PAULTRE, P. (2009). *Notes de cours de Génie Séismique (CIV 6510)*, École Polytechnique de Montréal, Département des génies Civil, Géologique et des Mines, Montréal.
- PENZIEN, J., WATABE, M. (1975). Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3-4, 365-374.
- PRIESLEY, M., SEIBLE, F., CALVI, G.M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*, John Wiley & Sons, New-York, 686 p.

- PRIESLEY, M., KOWALSKY, M.J. (2000). Direct Displacement-Based Design of Concrete Buildings. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 33(4), 421-444.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA. (2008). Géopanorama du Canada. La terre tremble à Québec http://geoscape.nrcan.gc.ca/quebec/eq_f.php, Consulté le 15 Septembre 2008.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA. (2008). Les zones sismiques au Canada. http://seismescanada.nrcan.gc.ca/zones/index_f.php, Consulté le 15 Septembre 2008.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA. (2009). Photographie des dégâts causés à la maçonnerie d'un bâtiment de Montréal-Est lors du séisme du Saguenay de 1988. http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/maps/environment/naturalhazards/earthquakes/fig7_montreal.jpg/image_view, Consulté le 10 Novembre 2009.
- ROSENBLUETH, E., CONTRERAS, H. (1977). Approximate design for multicomponent earthquakes. *Journal of Mechanical Engineering*, 10, 895-911.
- SIDDIQI, J., ATKINSON, G. (2002). Ground motion amplification at rock sites accross Canada as determined from the horizontal-to-vertical component ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81, 1-27.
- TRIFUNAC, M.D., BRADY, A.G. (1975). A study on the duration of strong eathquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65-3, 581-626.
- UDÍAS, A. (1999). *Principles of Seismology*, University Press, Cambridge, 475 p.
- USGS (2009). Earthquake : Northridge, California January 17, 1994. <http://egsc.usgs.gov/isb/pubs/booklets/rockfall.html>, Consulté le 10 Novembre 2009.
- WANITKORKUL, A., FILIATRAULT, A. (2005). Simulation of strong ground motions for seismic fragility evaluation of nonstructural components in hospitals. Technical Report MCEER-05-0005, University at Buffalo, The State University of New York at Buffalo, Buffalo, USA.

WELCH, B., JONES, K., HOBBS, J. (2003). *Practical Programming in Tcl and Tk*, 4^e édition

WIKIPEDIA. (2009). Tremblement de terre de 2009 à L'Aquila. http://fr.wikipedia.org/wiki/Tremblement_de_terre_de_2009_à_L'Aquila, Consulté le 5 Septembre 2009.

ACTUALITÉ SUR XINHUANET. (2008). Le bilan des morts suite au séisme du Sichuan va dépasser les 80 000. http://www.french.xinhuanet.com/french/2008-06/24/content_657241.htm, Consulté le 5 Septembre 2008.

KENTUCKY GEOLOGICAL SURVEY. (2008). *12 May, 2008 Sichuan, China Earthquake Reconnaissance*, Juin 2008.

ANNEXE I**TABLEAUX DES SÉISMES TRAITÉS**

Tableau I.1 Séismes historiques du Nord-est américain (ENA) traités .

Code	Séisme	Site, date et heure	Magnitude	Comp.	PGA (g)
ETO	Etowah	Lepanto	4.1 M _w	90°	0.022
		10/02/2005		360°	0.021
		14 h : 04 min		U _p	0.053
MIR1	Miramichi	Holmes Lake	5.0 M _b	18°	0.181
		31/03/1982	4.8 M _N	288°	0.347
		21 h : 02 min		U _p	0.154
MIR2	Miramichi	Mitchell Lake Rd.	5.0 M _b	118°	0.152
		31/03/1982	4.8 M _N	28°	0.236
		21 h : 02 min		U _p	0.582
MIR3	Miramichi	Loggie Lodge	5.0 M _b	189°	0.186
		31/03/1982	4.8 M _N	99°	0.397
		21 h : 02 min		U _p	0.153
MIR4	Miramichi	Loggie Lodge	4.0 M _N	189°	0.117
		06/05/1982		99°	0.149
		16 h : 28 min		U _p	0.068
MIR5	Miramichi	Indian Brook	5.0 M _b	321°	0.425
		31/03/1982	4.8 M _N	231°	0.413
		21 h : 02 min		U _p	0.147
NAH1	Nahanni	Iverson	6.9 M _s	10°	1.101
		23/12/1985	6.4 M _b	280°	1.345
		05 h : 16 min	6.1 M _N	U _p	2.367
NAH2	Nahanni	Iverson	5.4 M _b	10°	0.228
		23/12/1985	5.2 M _N	280°	0.089
		05 h : 48 min		U _p	0.112
NAH3	Nahanni	Slide Mountain	4.6 M _s	330°	0.382
		09/11/1985	4.8 M _b	240°	0.460
		04 h : 46 min	4.6 M _N	U _p	0.254
NAH4	Nahanni	Battlement Creek	6.9 M _s	360°	0.194
		23/12/1985	6.4 M _b	270°	0.186
		05 h : 16 min	6.1 M _N	U _p	0.181
NAH5	Nahanni	Battlement Creek	5.0 M _s	360°	0.105
		25/12/1985	5.7 M _b	270°	0.089
		15 h : 42 min	5.3 M _N	U _p	0.074

Tableau I.1 Séismes historiques du Nord-est américain (ENA) traités (Suite).

Code	Séisme	Site, date et heure	Magnitude	Comp.	PGA (g)
SAG1	Saguenay	Saint Ferreol	5.8 M _s	0°	0.121
		25/11/1988	5.9 M _w	270°	0.097
		23 h : 46 min		Up	0.062
SAG2	Saguenay	Québec	5.8 M _s	51°	0.051
		25/11/1988	5.9 M _w	321°	0.051
		23 h : 46 min		Up	0.020
SAG3	Saguenay	Tadoussac	5.8 M _s	97°	0.027
		25/11/1988	5.9 M _w	7°	0.002
		23 h : 46 min		Up	0.053
SAG4	Saguenay	Baie-St-Paul	5.8 M _s	175°	0.125
		25/11/1988	5.9 M _w	85°	0.174
		23 h : 46 min		Up	0.124
SAG5	Saguenay	La Malbaie	5.8 M _s	63°	0.124
		25/11/1988	5.9 M _w	333°	0.060
		23 h : 46 min		Up	0.068
SAG6	Saguenay	St-Pascal	5.8 M _s	0°	0.046
		25/11/1988	5.9 M _w	270°	0.056
		23 h : 46 min		Up	0.037
SAG7	Saguenay	Rivière-Ouelle	5.8 M _s	0°	0.040
		25/11/1988	5.9 M _w	270°	0.057
		23 h : 46 min		Up	0.023
SAG8	Saguenay	Chicoutimi-Nord	5.8 M _s	214°	0.107
		25/11/1988	5.9 M _w	124°	0.131
		23 h : 46 min		Up	0.102
SAG9	Saguenay	St-Andre-du-Lac	5.8 M _s	0°	0.156
		25/11/1988	5.9 M _w	270°	0.091
		23 h : 46 min		Up	0.045
SAG10	Saguenay	Les Éboulements	5.8 M _s	0°	0.125
		25/11/1988	5.9 M _w	270°	0.102
		23 h : 46 min		Up	0.234
SAG11	Saguenay	Dickey	5.8 M _s	90°	0.092
		25/11/1988	5.9 M _w	0°	0.063
		23 h : 46 min		Up	0.033

Tableau I.2 Séismes historiques du Nord-ouest américain (WNA) traités.

Code	Séisme	Site, date	Magnitude	Comp.	PGA
		et heure			(g)
IMP	Imperial Valley	El Centro	6.9 M _w	180°	0.313
		19/05/1940		270°	0.215
		04 h : 37 min		Up	0.205
LOM	Loma Prieta	Gilroy Array	7.0 M _w	0°	0.411
		18/10/1989		90°	0.473
		00 h : 05 min		Up	0.209
NOR	Northridge	Century City	6.7 M _w	90°	0.256
		17/01/1994		360°	0.222
		12 h : 31 min		Up	0.116
PAR	Parkfield	Temblor	6.1 M _w	205°	0.357
		28/06/1966		295°	0.272
		04 h : 26 min		Up	0.136
SAN	San Fernando	Hollywood Store	6.6 M _w	90°	0.210
		09/02/1971		180°	0.174
		14 h : 00 min		Up	0.136

Tableau I.3 Séismes artificiels du Nord-est américain (ENA) traités.

Code	Ville	Magnitude	Distance	Comp.	PGA (g)	Facteur de correction
HAL1	Halifax	6.0 M_w	$R = 50$ km	Trial 1 Trial 2	0.180 0.139	0.75
HAL2	Halifax	6.0 M_w	$R = 50$ km	Trial 1 Trial 3	0.180 0.151	0.75
HAL3	Halifax	6.0 M_w	$R = 50$ km	Trial 1 Trial 4	0.180 0.155	0.75
HAL4	Halifax	6.0 M_w	$R = 50$ km	Trial 2 Trial 3	0.139 0.151	0.75
HAL5	Halifax	6.0 M_w	$R = 50$ km	Trial 2 Trial 4	0.139 0.155	0.75
HAL6	Halifax	6.0 M_w	$R = 50$ km	Trial 3 Trial 4	0.151 0.155	0.75
MAL1	La Malbaie	7.0 M_w	$R = 20$ km	Trial 1 Trial 2	1.284 1.269	0.75
MAL2	La Malbaie	7.0 M_w	$R = 20$ km	Trial 1 Trial 3	1.284 1.445	0.75
MAL3	La Malbaie	7.0 M_w	$R = 20$ km	Trial 1 Trial 4	1.284 1.216	0.75
MAL4	La Malbaie	7.0 M_w	$R = 20$ km	Trial 2 Trial 3	1.269 1.445	0.75
MAL5	La Malbaie	7.0 M_w	$R = 20$ km	Trial 2 Trial 4	1.269 1.216	0.75
MAL6	La Malbaie	7.0 M_w	$R = 20$ km	Trial 3 Trial 4	1.445 1.216	0.75
MON1	Montreal	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 2	0.365 0.444	0.85
MON2	Montreal	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 3	0.365 0.399	0.85
MON3	Montreal	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 4	0.365 0.373	0.85

Tableau I.3 Séismes artificiels du Nord-est américain (ENA) traités (Suite).

Code	Ville	Magnitude	Distance	Comp.	PGA (g)	Facteur de correction
MON4	Montreal	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 2 Trial 3	0.444 0.399	0.85
MON5	Montreal	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 2 Trial 4	0.444 0.373	0.85
MON6	Montreal	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 3 Trial 4	0.399 0.373	0.85
MON7	Montreal	7.0 M_w	$R = 70$ km	Trial 1 Trial 2	0.271 0.257	0.90
MON8	Montreal	7.0 M_w	$R = 70$ km	Trial 1 Trial 3	0.271 0.308	0.90
MON9	Montreal	7.0 M_w	$R = 70$ km	Trial 1 Trial 4	0.271 0.262	0.90
MON10	Montreal	7.0 M_w	$R = 70$ km	Trial 2 Trial 3	0.257 0.308	0.90
MON11	Montreal	7.0 M_w	$R = 70$ km	Trial 2 Trial 4	0.257 0.262	0.90
MON12	Montreal	7.0 M_w	$R = 70$ km	Trial 3 Trial 4	0.308 0.262	0.90
OTT1	Ottawa	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 2	0.344 0.417	0.80
OTT2	Ottawa	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 3	0.344 0.376	0.80
OTT3	Ottawa	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 4	0.344 0.352	0.80
OTT4	Ottawa	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 2 Trial 3	0.417 0.376	0.80
OTT5	Ottawa	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 2 Trial 4	0.417 0.352	0.80
OTT6	Ottawa	6.0 M_w	$R = 30$ km	Trial 3 Trial 4	0.376 0.352	0.80

Tableau I.3 Séismes artificiels du Nord-est américain (ENA) traités (Suite2).

Code	Ville	Magnitude	Distance	Comp.	PGA (g)	Facteur de correction
QUE1	Quebec	6.0 M _w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 2	0.301 0.365	0.70
QUE2	Quebec	6.0 M _w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 3	0.301 0.329	0.70
QUE3	Quebec	6.0 M _w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 4	0.301 0.308	0.70
QUE4	Quebec	6.0 M _w	$R = 30$ km	Trial 2 Trial 3	0.365 0.329	0.70
QUE5	Quebec	6.0 M _w	$R = 30$ km	Trial 2 Trial 4	0.365 0.308	0.70
QUE6	Quebec	6.0 M _w	$R = 30$ km	Trial 3 Trial 4	0.329 0.308	0.70
QUE7	Quebec	7.0 M _w	$R = 70$ km	Trial 1 Trial 2	0.241 0.228	0.80
QUE8	Quebec	7.0 M _w	$R = 70$ km	Trial 1 Trial 3	0.241 0.274	0.80
QUE9	Quebec	7.0 M _w	$R = 70$ km	Trial 1 Trial 4	0.241 0.233	0.80
QUE10	Quebec	7.0 M _w	$R = 70$ km	Trial 2 Trial 3	0.228 0.274	0.80
QUE11	Quebec	7.0 M _w	$R = 70$ km	Trial 2 Trial 4	0.228 0.233	0.80
QUE12	Quebec	7.0 M _w	$R = 70$ km	Trial 3 Trial 4	0.274 0.233	0.80

Tableau I.4 Séismes artificiels du Nord-ouest américain (WNA) traités.

Code	Ville	Magnitude	Distance	Comp.	PGA (g)	Facteur de correction
PRI1	Prince George	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 1 Trial 2	0.065 0.070	0.25
PRI2	Prince George	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 1 Trial 3	0.065 0.045	0.25
PRI3	Prince George	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 1 Trial 4	0.065 0.066	0.25
PRI4	Prince George	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 2 Trial 3	0.070 0.045	0.25
PRI5	Prince George	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 2 Trial 4	0.070 0.066	0.25
PRI6	Prince George	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 3 Trial 4	0.045 0.066	0.25
TOF1	Tofino	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 1 Trial 2	0.259 0.279	1.00
TOF2	Tofino	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 1 Trial 3	0.259 0.180	1.00
TOF3	Tofino	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 1 Trial 4	0.259 0.263	1.00
TOF4	Tofino	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 2 Trial 3	0.279 0.180	1.00
TOF5	Tofino	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 2 Trial 4	0.279 0.263	1.00
TOF6	Tofino	6.5 M _w	$R = 50$ km	Trial 3 Trial 4	0.180 0.263	1.00
VAN1	Vancouver	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 2	0.533 0.537	1.00
VAN2	Vancouver	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 3	0.533 0.578	1.00
VAN3	Vancouver	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 1 Trial 4	0.533 0.387	1.00

Tableau I.4 Séismes artificiels du Nord-ouest américain (WNA) traités (Suite).

Code	Ville	Magnitude	Distance	Comp.	PGA (g)	Facteur de correction
VAN4	Vancouver	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 2	0.537	1.00
				Trial 3	0.578	
VAN5	Vancouver	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 2	0.537	1.00
				Trial 4	0.387	
VAN6	Vancouver	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 3	0.578	1.00
				Trial 4	0.387	
VAN7	Vancouver	7.2 M _w	$R = 70$ km	Trial 1	0.247	1.00
				Trial 2	0.259	
VAN8	Vancouver	7.2 M _w	$R = 70$ km	Trial 1	0.247	1.00
				Trial 3	0.230	
VAN9	Vancouver	7.2 M _w	$R = 70$ km	Trial 1	0.247	1.00
				Trial 4	0.252	
VAN10	Vancouver	7.2 M _w	$R = 70$ km	Trial 2	0.259	1.00
				Trial 3	0.230	
VAN11	Vancouver	7.2 M _w	$R = 70$ km	Trial 2	0.259	1.00
				Trial 4	0.252	
VAN12	Vancouver	7.2 M _w	$R = 70$ km	Trial 3	0.230	1.00
				Trial 4	0.252	
VIC1	Victoria	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 1	0.640	1.20
				Trial 2	0.644	
VIC2	Victoria	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 1	0.640	1.20
				Trial 3	0.694	
VIC3	Victoria	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 1	0.640	1.20
				Trial 4	0.464	
VIC4	Victoria	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 2	0.644	1.20
				Trial 3	0.694	
VIC5	Victoria	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 2	0.644	1.20
				Trial 4	0.464	
VIC6	Victoria	6.5 M _w	$R = 30$ km	Trial 3	0.694	1.20
				Trial 4	0.464	

ANNEXE II**SPECTRES ÉLASTIQUES CLASSÉ PAR (M, R)**

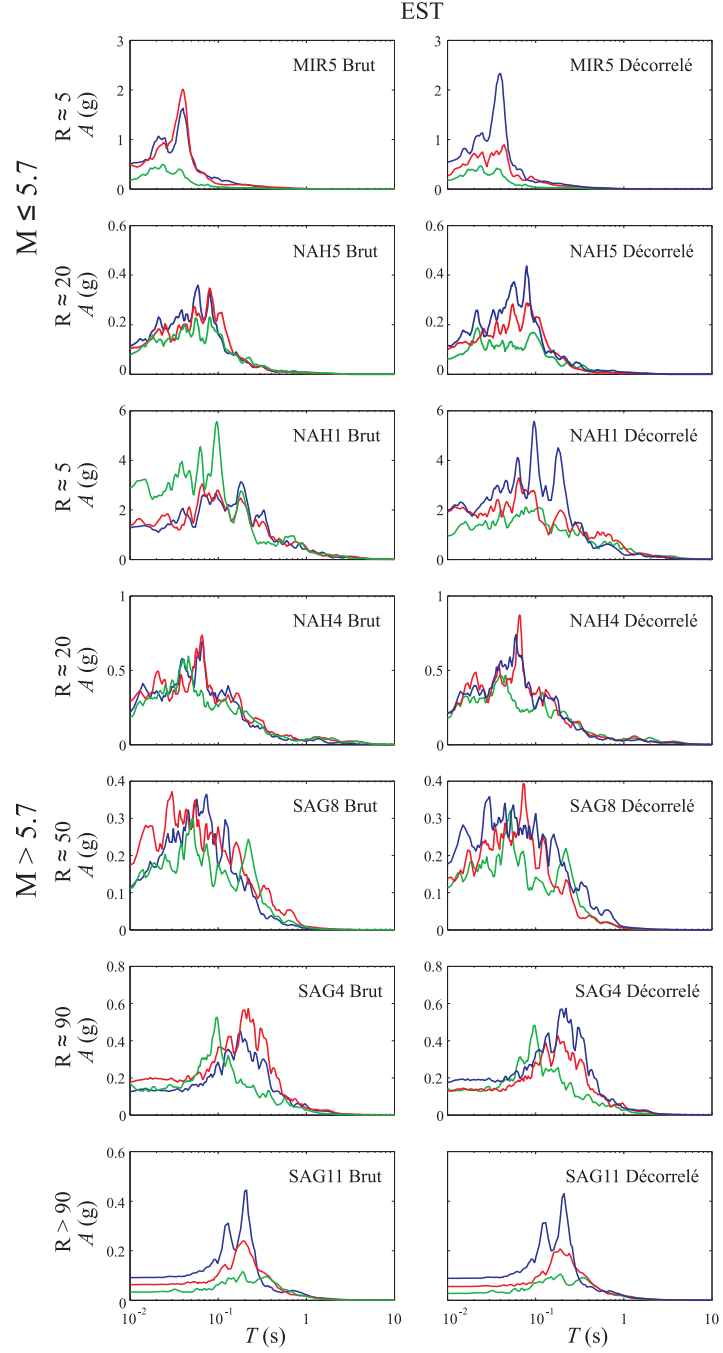


FIG. II.1 : Spectres élastiques bruts et décorrélés de quelques séismes historiques de l'Est.
Légende : vert = composante z ou V ; bleu = composante x ou H_1 ; rouge = composante y ou H_2

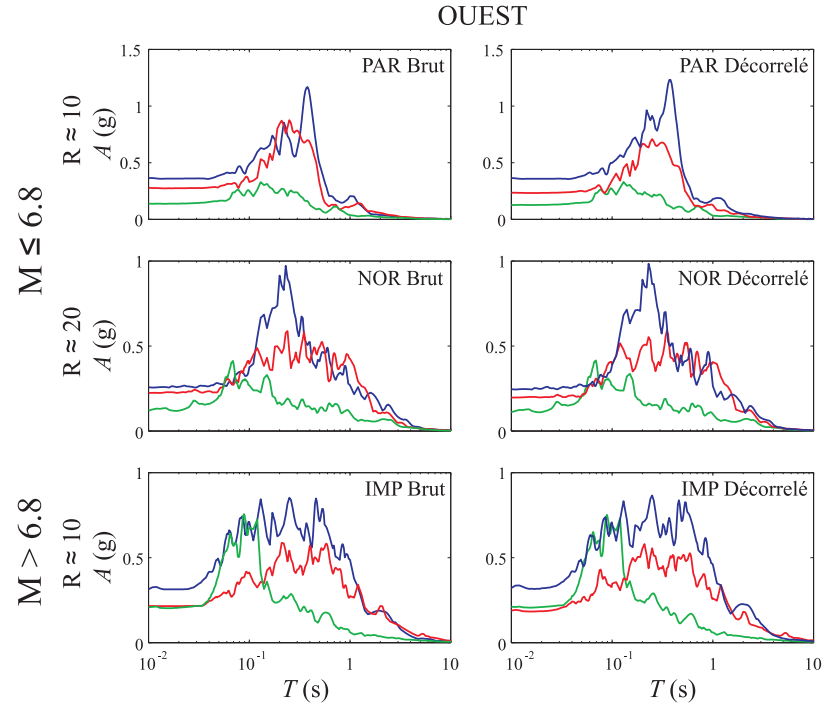


FIG. II.2 : Spectres élastiques bruts et décorrélés de quelque séisme historique de l'Ouest.
Légende : vert = composante z ou V ; bleu = composante x ou H_1 ; rouge = composante y ou H_2

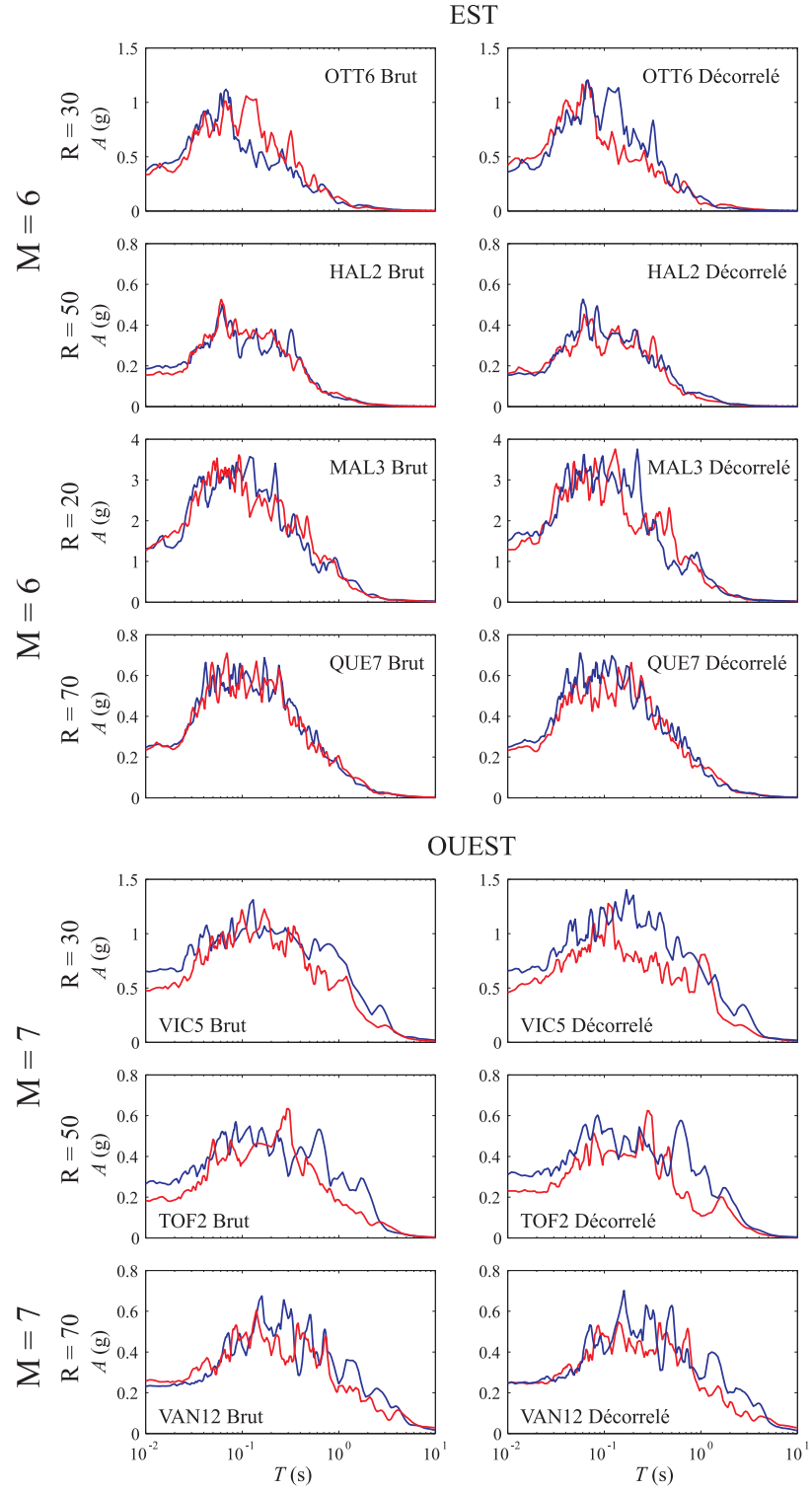


FIG. II.3 : Spectres élastiques bruts et décorrelés de quelque séisme artificiel. *Légende : bleu = composante x ou H_1 ; rouge = composante y ou H_2*

ANNEXE III**RAPPORTS D'AMPLITUDE ÉLASTIQUES (RASE)**

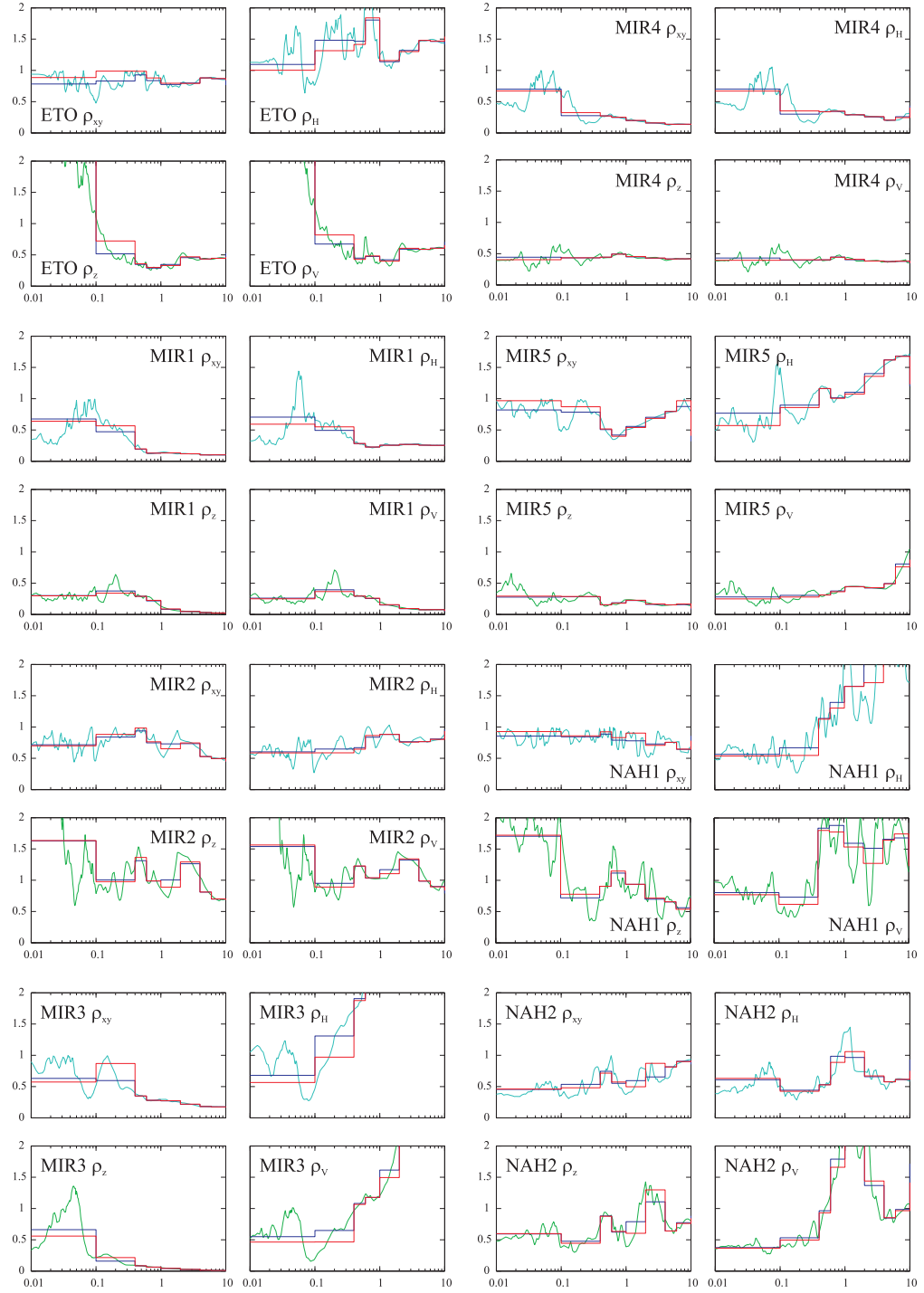


FIG. III.1 : Rapports d'amplitude spectrale des séismes historiques de l'Est. *Légende :* *cyan* = ρ_{xy} ou ρ_H ; *vert* = ρ_z ou ρ_V ; *bleu* = $\bar{\rho}$; *rouge* = $\tilde{\rho}$

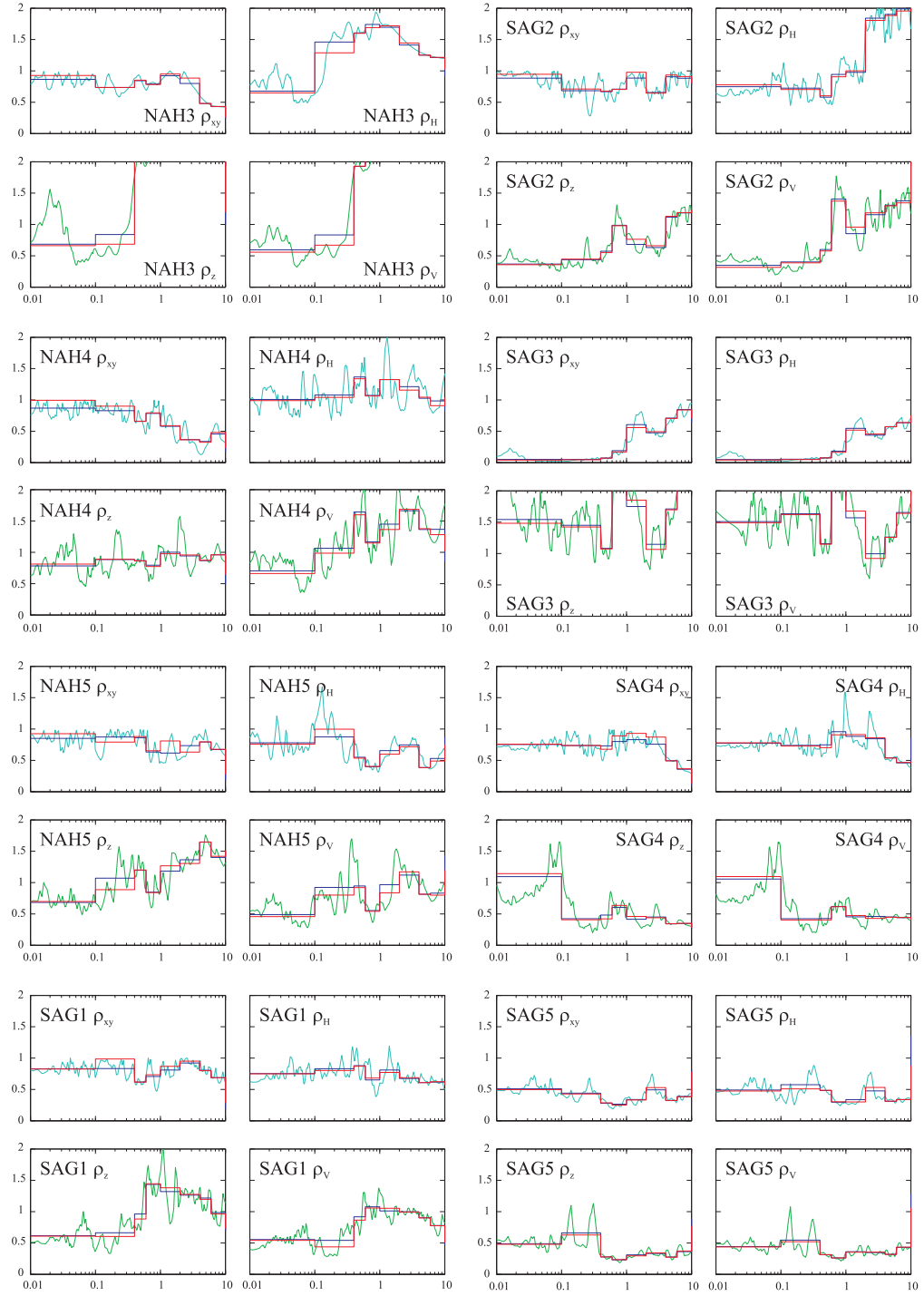


FIG. III.1 : Rapports d'amplitude spectrale des séismes historiques de l'Est (suite). *Lé-
gende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; vert = ρ_z ou ρ_V ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$*

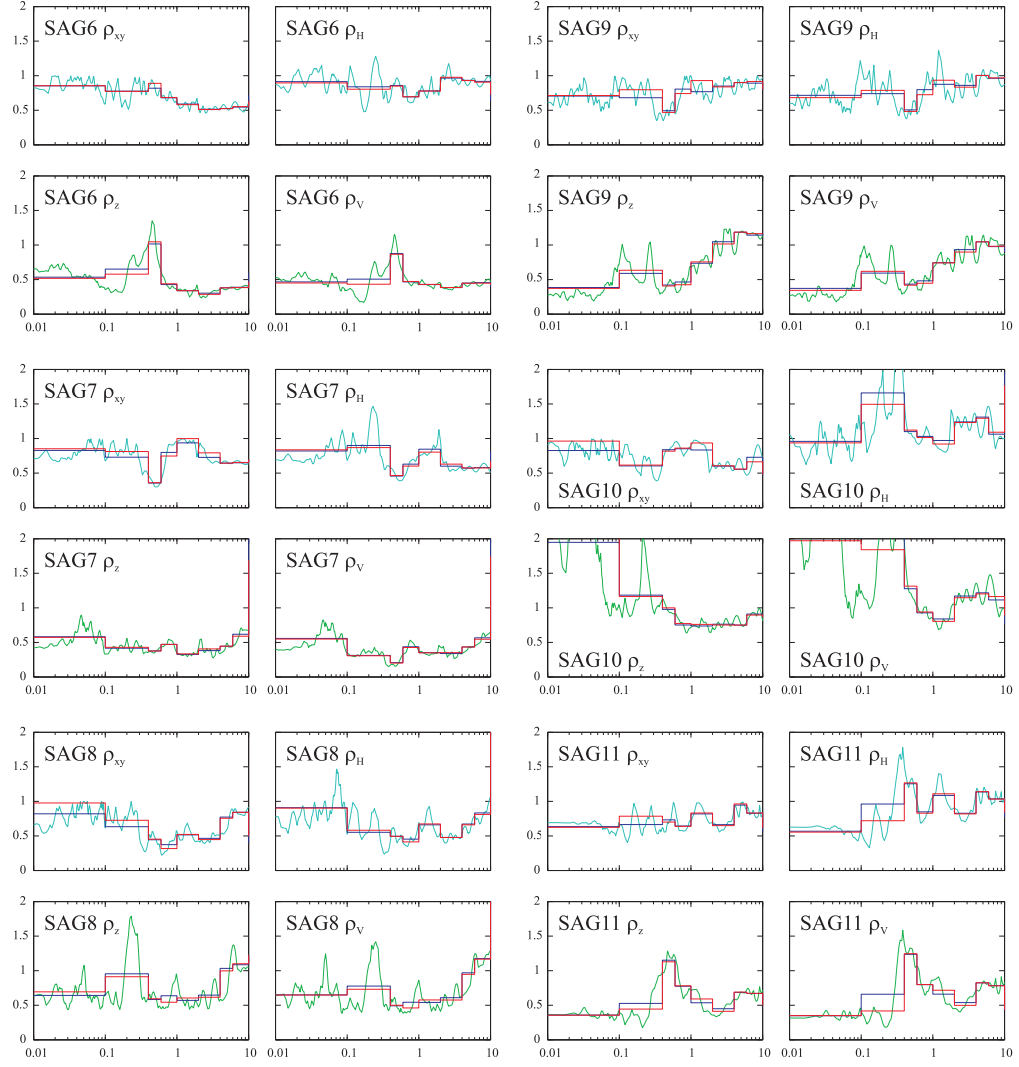


FIG. III.1 : Rapports d'amplitude spectrale des séismes historiques de l'Est (suite2).
 Légende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; vert = ρ_z ou ρ_v ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$

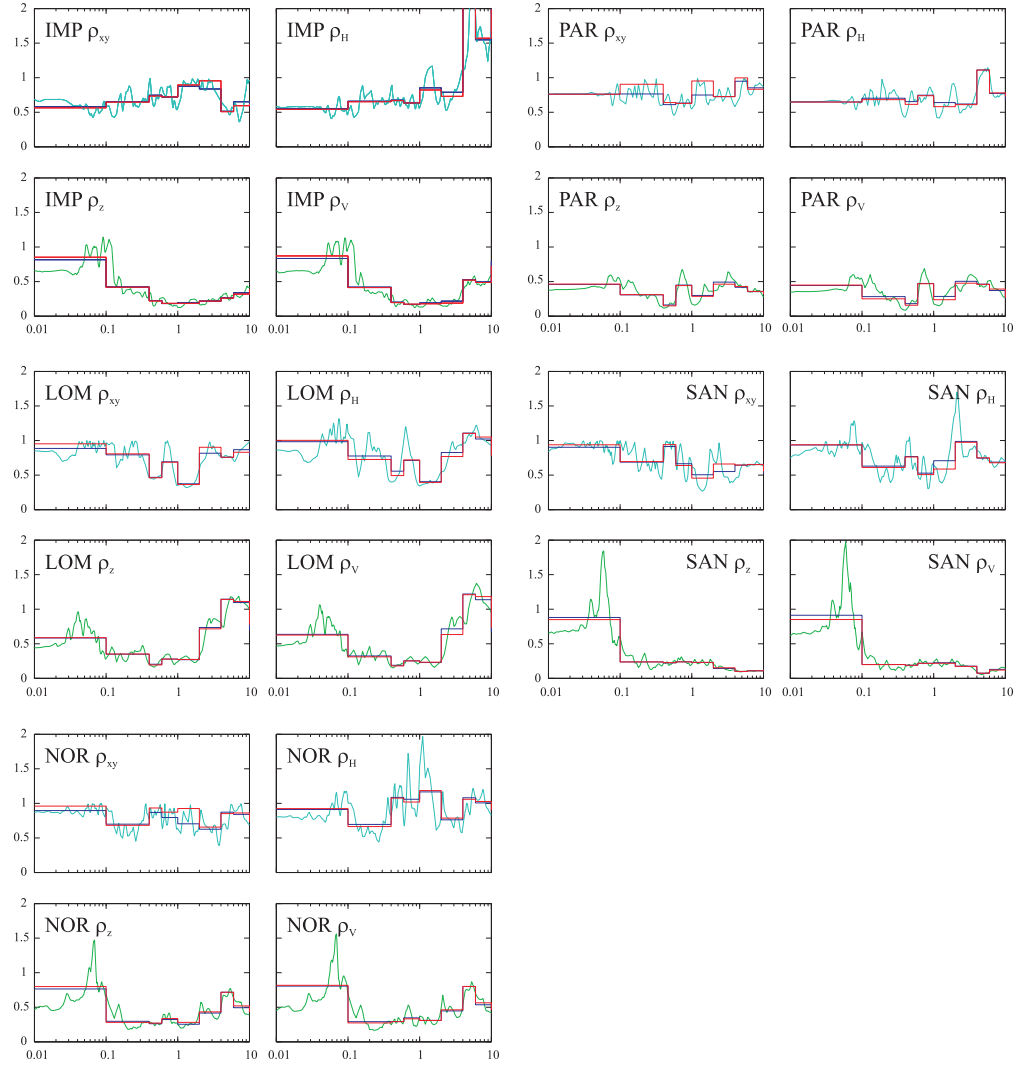


FIG. III.2 : Rapports d'amplitude spectrale des séismes historiques de l'Ouest. *Légende :* *cyan* = ρ_{xy} ou ρ_H ; *vert* = ρ_z ou ρ_v ; *bleu* = $\bar{\rho}$; *rouge* = $\tilde{\rho}$

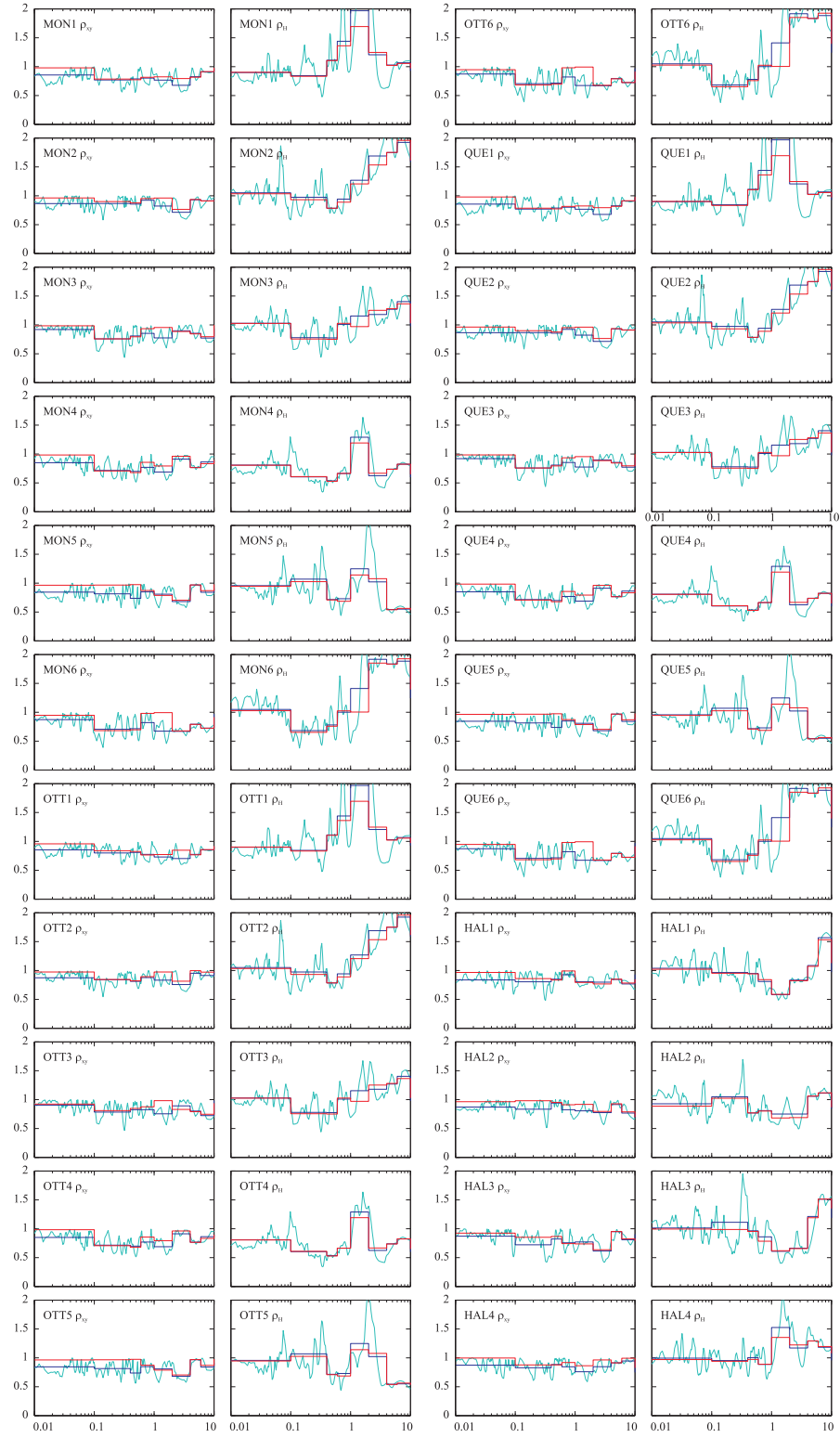


FIG. III.3 : Rapports d'amplitude spectrale des séismes synthétiques de l'Est. *Légende :*
 cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$

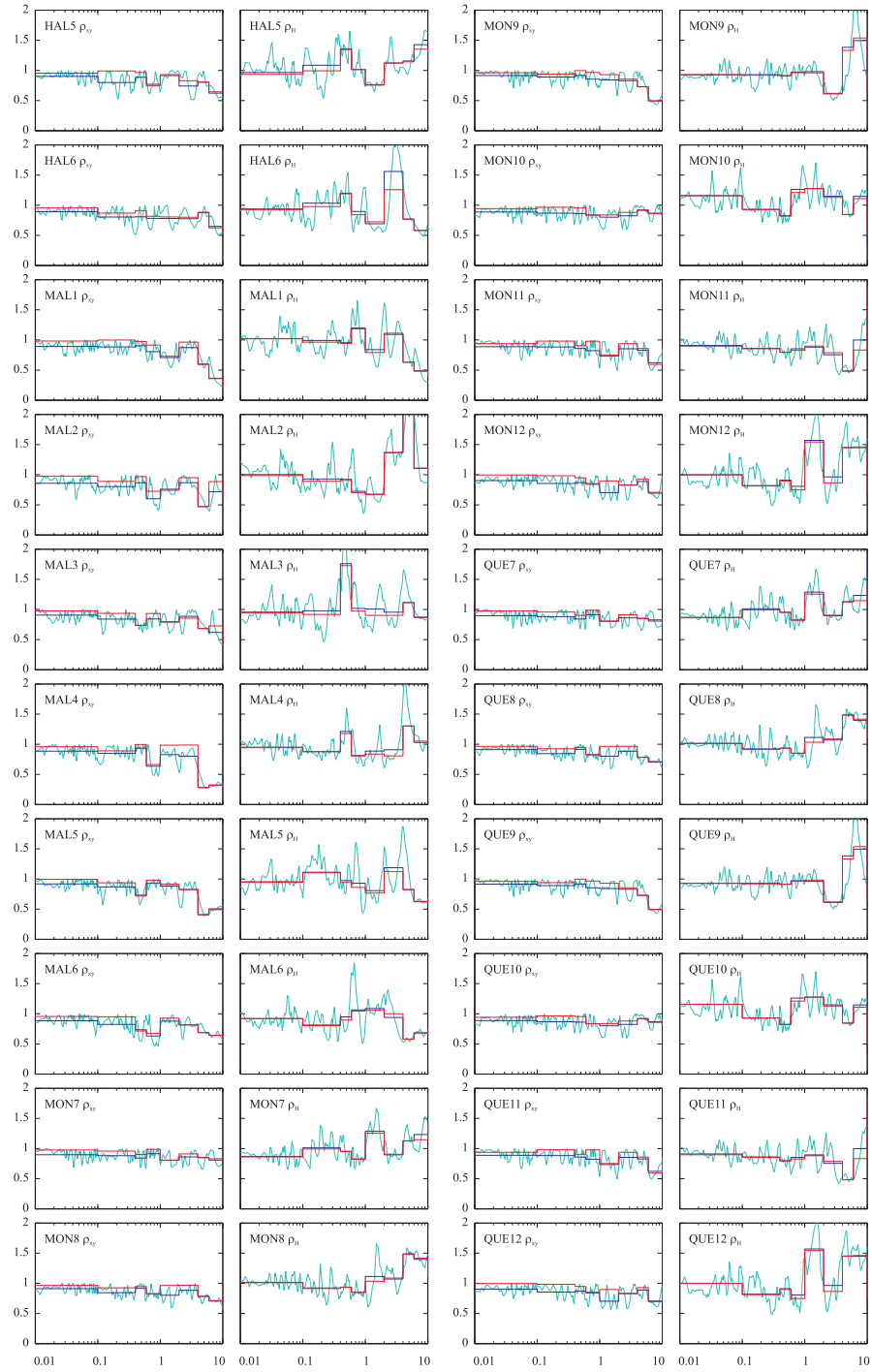


FIG. III.3 : Rapports d'amplitude spectrale des séismes synthétiques de l'Est (suite).
 Légende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$

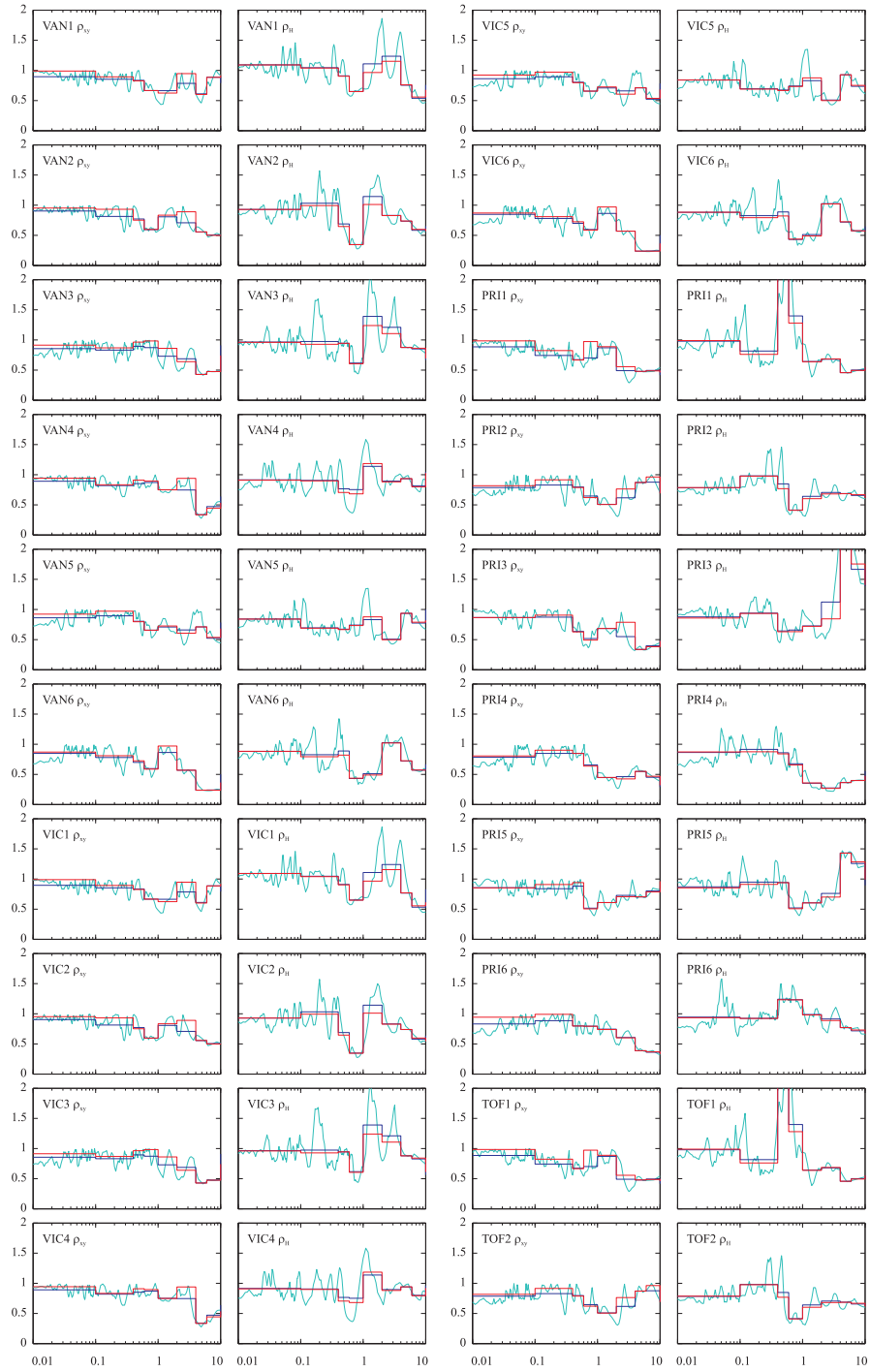


FIG. III.4 : Rapports d'amplitude spectrale des séismes synthétiques de l'Ouest. *Légende :*
 cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$

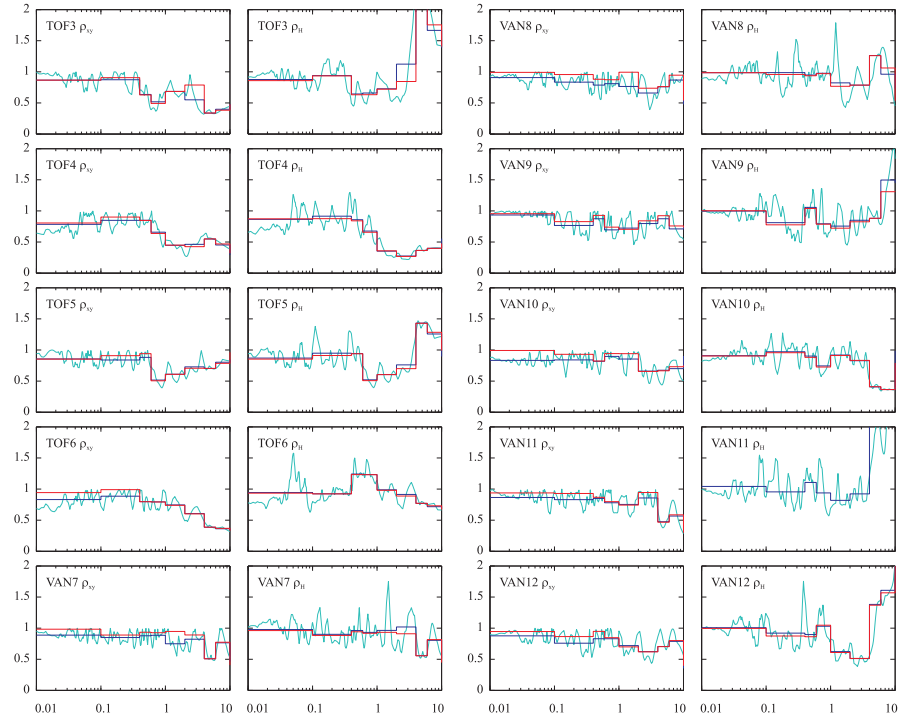


FIG. III.4 : Rapports d'amplitude spectrale des séismes synthétiques de l'Ouest (suite).
 Légende : cyan = ρ_{xy} ou ρ_H ; bleu = $\bar{\rho}$; rouge = $\tilde{\rho}$

Tableau III.1 Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Est.

Groupement	ρ_i et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\rho_i)$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M \leq 5.7, R \approx 5	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.706	0.676	0.555	0.454	0.464	0.526	0.434	0.459
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.694	0.606	0.549	0.452	0.486	0.483	0.434	0.446
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.156	0.145	0.065	0.055	0.067	0.047	0.010	0.016
	$\tilde{\rho}_z$	0.635	0.483	0.746	0.666	0.709	0.907	0.668	0.648
	$\overline{\rho_z}$	0.656	0.510	0.740	0.668	0.752	0.865	0.667	0.646
	$\sigma(\overline{\rho_z})$	0.288	0.132	0.053	0.057	0.120	0.068	0.015	0.021
	$\tilde{\rho}_H$	0.609	0.719	0.919	1.025	1.146	1.369	1.702	1.705
	$\overline{\rho_H}$	0.678	0.793	0.928	1.042	1.166	1.407	1.703	1.705
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.241	0.204	0.066	0.092	0.163	0.150	0.016	0.041
	$\tilde{\rho}_V$	0.549	0.510	0.880	1.019	1.218	1.258	1.375	1.419
	$\overline{\rho_V}$	0.575	0.580	0.886	1.057	1.225	1.275	1.375	1.429
	$\sigma(\overline{\rho_V})$	0.228	0.166	0.064	0.125	0.131	0.184	0.029	0.057
M \leq 5.7, R \approx 20	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.905	0.890	0.934	0.766	0.801	0.712	0.838	0.774
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.817	0.851	0.895	0.735	0.696	0.766	0.837	0.769
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.116	0.129	0.077	0.112	0.115	0.085	0.051	0.037
	$\tilde{\rho}_z$	1.379	0.805	0.781	0.570	0.799	0.887	1.041	0.932
	$\overline{\rho_z}$	1.412	0.793	0.772	0.568	0.765	0.910	1.040	0.924
	$\sigma(\overline{\rho_z})$	0.437	0.233	0.097	0.084	0.168	0.068	0.034	0.052
	$\tilde{\rho}_H$	0.881	1.156	0.975	1.121	0.878	1.009	0.932	0.980
	$\overline{\rho_H}$	0.937	1.178	1.008	1.102	0.897	1.033	0.933	0.997
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.225	0.293	0.216	0.247	0.124	0.066	0.012	0.070
	$\tilde{\rho}_V$	1.324	0.809	0.674	0.512	0.618	0.888	0.702	0.703
	$\overline{\rho_V}$	1.509	0.798	0.697	0.514	0.694	0.855	0.701	0.720
	$\sigma(\overline{\rho_V})$	0.588	0.284	0.212	0.111	0.244	0.083	0.029	0.053

Tableau III.1 Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).

Groupement	ρ_i et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\rho_i)$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M > 5.7, R \approx 5	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.927	0.858	0.923	0.830	0.903	0.707	0.755	0.647
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.855	0.843	0.887	0.789	0.779	0.728	0.754	0.642
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.096	0.070	0.055	0.111	0.150	0.150	0.010	0.062
	$\tilde{\rho}_z$	1.721	0.777	0.905	1.148	0.937	0.715	0.657	0.537
	$\overline{\rho_z}$	1.705	0.720	0.905	1.116	0.936	0.698	0.654	0.562
	$\sigma(\overline{\rho_z})$	0.305	0.351	0.222	0.234	0.216	0.285	0.026	0.106
	$\tilde{\rho}_H$	0.539	0.548	1.128	1.304	1.650	1.711	2.483	2.064
	$\overline{\rho_H}$	0.565	0.669	1.139	1.395	1.653	2.219	2.469	2.031
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.123	0.273	0.194	0.346	0.546	1.188	0.142	0.207
	$\tilde{\rho}_V$	0.771	0.617	1.800	1.776	1.535	1.273	1.643	1.743
	$\overline{\rho_V}$	0.806	0.733	1.835	1.880	1.594	1.514	1.658	1.681
	$\sigma(\overline{\rho_V})$	0.160	0.270	0.313	0.375	0.550	0.554	0.143	0.278
M > 5.7, R \approx 20	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.995	0.902	0.662	0.794	0.589	0.365	0.324	0.482
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.870	0.829	0.658	0.786	0.579	0.367	0.337	0.459
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.090	0.106	0.107	0.144	0.209	0.149	0.064	0.110
	$\tilde{\rho}_z$	0.813	0.888	0.862	0.774	0.976	0.958	0.873	0.960
	$\overline{\rho_z}$	0.783	0.885	0.868	0.794	1.001	0.942	0.867	0.960
	$\sigma(\overline{\rho_z})$	0.211	0.213	0.075	0.191	0.218	0.276	0.032	0.098
	$\tilde{\rho}_H$	0.990	1.041	1.338	1.064	1.325	1.157	1.044	0.909
	$\overline{\rho_H}$	1.008	1.079	1.366	1.072	1.324	1.212	1.027	0.985
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.198	0.241	0.159	0.130	0.372	0.261	0.127	0.202
	$\tilde{\rho}_V$	0.661	0.985	1.598	1.148	1.364	1.686	1.377	1.282
	$\overline{\rho_V}$	0.704	1.064	1.643	1.167	1.449	1.664	1.364	1.366
	$\sigma(\overline{\rho_V})$	0.209	0.237	0.272	0.237	0.474	0.186	0.098	0.212

Tableau III.1 Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).

Groupement	ρ_i et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\rho_i)$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M > 5.7, R \approx 50	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.845	0.762	0.461	0.529	0.726	0.642	0.827	0.879
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.762	0.657	0.469	0.589	0.642	0.657	0.837	0.867
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.126	0.217	0.083	0.142	0.112	0.078	0.079	0.055
	$\tilde{\rho}_z$	0.533	0.774	0.500	0.484	0.680	0.815	1.092	1.133
	$\overline{\rho_z}$	0.514	0.772	0.503	0.551	0.653	0.847	1.110	1.114
	$\sigma(\overline{\rho_z})$	0.143	0.346	0.070	0.148	0.108	0.146	0.124	0.075
	$\tilde{\rho}_H$	0.792	0.685	0.489	0.569	0.804	0.656	0.832	0.889
	$\overline{\rho_H}$	0.812	0.646	0.500	0.625	0.768	0.669	0.838	0.898
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.205	0.230	0.082	0.138	0.202	0.082	0.071	0.103
	$\tilde{\rho}_V$	0.496	0.675	0.459	0.454	0.659	0.737	0.997	1.075
	$\overline{\rho_V}$	0.511	0.685	0.463	0.513	0.642	0.771	1.008	1.076
	$\sigma(\overline{\rho_V})$	0.180	0.299	0.067	0.131	0.109	0.129	0.118	0.088
M > 5.7, R \approx 90	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.739	0.594	0.594	0.667	0.732	0.668	0.458	0.471
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.696	0.594	0.616	0.639	0.668	0.618	0.457	0.491
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.081	0.123	0.100	0.084	0.108	0.094	0.033	0.083
	$\tilde{\rho}_z$	1.217	0.733	0.566	0.548	0.505	0.511	0.455	0.540
	$\overline{\rho_z}$	1.177	0.756	0.579	0.530	0.488	0.515	0.457	0.540
	$\sigma(\overline{\rho_z})$	0.503	0.274	0.110	0.067	0.082	0.066	0.020	0.049
	$\tilde{\rho}_H$	0.731	0.911	0.771	0.741	0.711	0.875	0.715	0.632
	$\overline{\rho_H}$	0.741	0.991	0.777	0.762	0.731	0.854	0.720	0.621
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.118	0.269	0.123	0.139	0.185	0.154	0.060	0.078
	$\tilde{\rho}_V$	1.168	0.921	0.678	0.606	0.544	0.644	0.656	0.680
	$\overline{\rho_V}$	1.176	0.997	0.672	0.603	0.551	0.660	0.663	0.662
	$\sigma(\overline{\rho_V})$	0.500	0.344	0.126	0.053	0.115	0.067	0.063	0.091

Tableau III.1 Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).

Groupement	ρ_i et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\rho_i)$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M > 5.7, R > 90	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.821	0.814	0.649	0.702	0.852	0.709	0.773	0.727
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.806	0.737	0.639	0.708	0.808	0.696	0.766	0.718
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.084	0.150	0.085	0.121	0.087	0.066	0.043	0.054
	$\tilde{\rho}_z$	0.482	0.501	0.797	0.823	0.682	0.608	0.769	0.759
	$\overline{\rho_z}$	0.492	0.539	0.816	0.819	0.640	0.606	0.769	0.769
	$\sigma(\overline{\rho_z})$	0.098	0.177	0.154	0.121	0.151	0.073	0.056	0.088
	$\tilde{\rho}_H$	0.763	0.779	0.811	0.743	0.892	0.983	1.027	1.018
	$\overline{\rho_H}$	0.760	0.851	0.806	0.753	0.899	0.982	1.030	1.028
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.107	0.261	0.114	0.156	0.142	0.100	0.058	0.081
	$\tilde{\rho}_V$	0.441	0.396	0.751	0.826	0.702	0.683	0.781	0.779
	$\overline{\rho_V}$	0.455	0.484	0.768	0.837	0.661	0.683	0.783	0.793
	$\sigma(\overline{\rho_V})$	0.093	0.215	0.139	0.125	0.135	0.080	0.033	0.086

Tableau III.2 Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Ouest.

Groupement	ρ_i et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\rho_i)$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M \leq 6.8, R \approx 10	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.761	0.905	0.640	0.628	0.953	0.726	0.997	0.832
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.762	0.764	0.610	0.632	0.749	0.726	0.948	0.853
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.054	0.117	0.110	0.060	0.161	0.070	0.034	0.059
	$\tilde{\rho}_z$	0.464	0.310	0.149	0.442	0.286	0.462	0.428	0.358
	$\overline{\rho_z}$	0.459	0.308	0.162	0.450	0.299	0.492	0.418	0.354
	$\sigma(\overline{\rho_z})$	0.072	0.111	0.035	0.149	0.111	0.090	0.011	0.030
	$\tilde{\rho}_H$	0.648	0.682	0.615	0.739	0.580	0.611	1.111	0.780
	$\overline{\rho_H}$	0.649	0.702	0.654	0.746	0.640	0.619	1.111	0.772
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.035	0.133	0.112	0.072	0.178	0.102	0.022	0.077
	$\tilde{\rho}_V$	0.450	0.250	0.158	0.468	0.238	0.477	0.459	0.392
	$\overline{\rho_V}$	0.443	0.282	0.180	0.473	0.285	0.504	0.463	0.371
	$\sigma(\overline{\rho_V})$	0.092	0.137	0.051	0.147	0.112	0.084	0.039	0.072
M \leq 6.8, R \approx 20	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.949	0.689	0.937	0.755	0.691	0.658	0.749	0.756
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.899	0.693	0.891	0.730	0.604	0.589	0.759	0.747
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.067	0.155	0.077	0.136	0.187	0.150	0.069	0.060
	$\tilde{\rho}_z$	0.825	0.260	0.249	0.287	0.256	0.292	0.408	0.314
	$\overline{\rho_z}$	0.823	0.267	0.242	0.282	0.242	0.279	0.409	0.301
	$\sigma(\overline{\rho_z})$	0.309	0.113	0.017	0.045	0.037	0.049	0.023	0.046
	$\tilde{\rho}_H$	0.931	0.638	0.919	0.763	0.887	0.880	0.904	0.852
	$\overline{\rho_H}$	0.923	0.662	0.928	0.793	0.937	0.874	0.914	0.847
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.141	0.170	0.164	0.208	0.388	0.208	0.083	0.077
	$\tilde{\rho}_V$	0.834	0.236	0.240	0.275	0.263	0.318	0.437	0.342
	$\overline{\rho_V}$	0.859	0.246	0.241	0.282	0.268	0.311	0.438	0.333
	$\sigma(\overline{\rho_V})$	0.341	0.121	0.025	0.065	0.043	0.059	0.026	0.059

Tableau III.2 Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes historiques de l'Ouest (suite).

Groupement	ρ_i et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\rho_i)$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M > 6.8, R \approx 10	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.758	0.727	0.598	0.704	0.629	0.928	0.633	0.712
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.733	0.724	0.607	0.707	0.624	0.826	0.635	0.759
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.078	0.131	0.068	0.173	0.096	0.096	0.030	0.146
	$\tilde{\rho}_z$	0.720	0.385	0.207	0.232	0.229	0.466	0.702	0.716
	$\overline{\rho_z}$	0.699	0.385	0.215	0.230	0.232	0.476	0.705	0.717
	$\sigma(\overline{\rho_z})$	0.169	0.144	0.048	0.048	0.041	0.109	0.035	0.053
	$\tilde{\rho}_H$	0.773	0.690	0.581	0.677	0.608	0.749	1.728	1.311
	$\overline{\rho_H}$	0.767	0.717	0.616	0.673	0.629	0.808	1.724	1.285
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.118	0.157	0.129	0.172	0.144	0.158	0.134	0.119
	$\tilde{\rho}_V$	0.749	0.362	0.188	0.212	0.207	0.411	0.866	0.835
	$\overline{\rho_V}$	0.735	0.371	0.195	0.211	0.210	0.466	0.874	0.816
	$\sigma(\overline{\rho_V})$	0.182	0.147	0.036	0.036	0.048	0.141	0.062	0.092

Tableau III.3 Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes synthétiques de l'Est.

Groupement	ρ_i et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\rho_i)$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M = 6, R = 30	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.706	0.676	0.555	0.454	0.464	0.526	0.434	0.459
	$\overline{\rho}_{xy}$	0.694	0.606	0.549	0.452	0.486	0.483	0.434	0.446
	$\sigma(\overline{\rho}_{xy})$	0.156	0.145	0.065	0.055	0.067	0.047	0.010	0.016
	$\tilde{\rho}_H$	0.609	0.719	0.919	1.025	1.146	1.369	1.702	1.705
	$\overline{\rho}_H$	0.678	0.793	0.928	1.042	1.166	1.407	1.703	1.705
	$\sigma(\overline{\rho}_H)$	0.241	0.204	0.066	0.092	0.163	0.150	0.016	0.041
M = 6, R = 50	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.905	0.890	0.934	0.766	0.801	0.712	0.838	0.774
	$\overline{\rho}_{xy}$	0.817	0.851	0.895	0.735	0.696	0.766	0.837	0.769
	$\sigma(\overline{\rho}_{xy})$	0.116	0.129	0.077	0.112	0.115	0.085	0.051	0.037
	$\tilde{\rho}_H$	0.881	1.156	0.975	1.121	0.878	1.009	0.932	0.980
	$\overline{\rho}_H$	0.937	1.178	1.008	1.102	0.897	1.033	0.933	0.997
	$\sigma(\overline{\rho}_H)$	0.225	0.293	0.216	0.247	0.124	0.066	0.012	0.070
M = 7, R = 20	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.927	0.858	0.923	0.830	0.903	0.707	0.755	0.647
	$\overline{\rho}_{xy}$	0.855	0.843	0.887	0.789	0.779	0.728	0.754	0.642
	$\sigma(\overline{\rho}_{xy})$	0.096	0.070	0.055	0.111	0.150	0.150	0.010	0.062
	$\tilde{\rho}_H$	0.539	0.548	1.128	1.304	1.650	1.711	2.483	2.064
	$\overline{\rho}_H$	0.565	0.669	1.139	1.395	1.653	2.219	2.469	2.031
	$\sigma(\overline{\rho}_H)$	0.123	0.273	0.194	0.346	0.546	1.188	0.142	0.207
M = 7, R = 70	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.995	0.902	0.662	0.794	0.589	0.365	0.324	0.482
	$\overline{\rho}_{xy}$	0.870	0.829	0.658	0.786	0.579	0.367	0.337	0.459
	$\sigma(\overline{\rho}_{xy})$	0.090	0.106	0.107	0.144	0.209	0.149	0.064	0.110
	$\tilde{\rho}_H$	0.990	1.041	1.338	1.064	1.325	1.157	1.044	0.909
	$\overline{\rho}_H$	1.008	1.079	1.366	1.072	1.324	1.212	1.027	0.985
	$\sigma(\overline{\rho}_H)$	0.198	0.241	0.159	0.130	0.372	0.261	0.127	0.202

Tableau III.4 Rapports d'amplitude spectrale et écart type des groupements de séismes synthétiques de l'Ouest.

Groupement	ρ_i et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\rho_i)$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M = 6.5, R = 30	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.845	0.762	0.461	0.529	0.726	0.642	0.827	0.879
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.762	0.657	0.469	0.589	0.642	0.657	0.837	0.867
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.126	0.217	0.083	0.142	0.112	0.078	0.079	0.055
	$\tilde{\rho}_H$	0.792	0.685	0.489	0.569	0.804	0.656	0.832	0.889
	$\overline{\rho_H}$	0.812	0.646	0.500	0.625	0.768	0.669	0.838	0.898
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.205	0.230	0.082	0.138	0.202	0.082	0.071	0.103
M = 6.5, R = 50	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.739	0.594	0.594	0.667	0.732	0.668	0.458	0.471
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.696	0.594	0.616	0.639	0.668	0.618	0.457	0.491
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.081	0.123	0.100	0.084	0.108	0.094	0.033	0.083
	$\tilde{\rho}_H$	0.731	0.911	0.771	0.741	0.711	0.875	0.715	0.632
	$\overline{\rho_H}$	0.741	0.991	0.777	0.762	0.731	0.854	0.720	0.621
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.118	0.269	0.123	0.139	0.185	0.154	0.060	0.078
M = 7.2, R = 70	$\tilde{\rho}_{xy}$	0.821	0.814	0.649	0.702	0.852	0.709	0.773	0.727
	$\overline{\rho_{xy}}$	0.806	0.737	0.639	0.708	0.808	0.696	0.766	0.718
	$\sigma(\overline{\rho_{xy}})$	0.084	0.150	0.085	0.121	0.087	0.066	0.043	0.054
	$\tilde{\rho}_H$	0.763	0.779	0.811	0.743	0.892	0.983	1.027	1.018
	$\overline{\rho_H}$	0.760	0.851	0.806	0.753	0.899	0.982	1.030	1.028
	$\sigma(\overline{\rho_H})$	0.107	0.261	0.114	0.156	0.142	0.100	0.058	0.081

ANNEXE IV**RAPPORTS D'AMPLITUDE INÉLASTIQUES (RASI)**

Tableau IV.1 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est.

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M \leq 5.7, R \approx 5	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.678	0.793	0.928	1.042	1.166	1.407	1.673	1.705
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.670	0.822	0.983	0.999	1.214	1.471	1.815	1.667
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.669	0.878	0.987	0.976	1.224	1.507	1.891	1.694
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.638	0.847	0.949	1.136	1.416	1.750	2.167	1.533
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.675	0.868	1.017	1.210	1.550	1.935	2.110	1.428
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.685	0.877	1.076	1.263	1.611	2.036	1.945	1.383
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.051	0.081	0.041	0.038	0.045	0.097	0.035	0.016
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.066	0.100	0.039	0.059	0.039	0.102	0.121	0.169
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.068	0.146	0.067	0.046	0.056	0.096	0.133	0.256
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.081	0.124	0.043	0.103	0.053	0.123	0.092	0.214
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.085	0.102	0.037	0.107	0.104	0.172	0.177	0.157
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.084	0.092	0.067	0.076	0.129	0.194	0.173	0.121
	$\bar{\rho}_V^{(1)}$	0.575	0.580	0.886	1.057	1.225	1.275	1.362	1.429
	$\bar{\rho}_V^{(1.5)}$	0.558	0.630	0.901	0.982	1.177	1.312	1.447	1.404
	$\bar{\rho}_V^{(2)}$	0.541	0.676	0.931	0.992	1.165	1.320	1.495	1.423
	$\bar{\rho}_V^{(4)}$	0.486	0.772	1.055	1.156	1.175	1.423	1.629	1.334
	$\bar{\rho}_V^{(6)}$	0.474	0.815	1.268	1.238	1.193	1.557	1.603	1.258
	$\bar{\rho}_V^{(8)}$	0.473	0.814	1.208	1.163	1.217	1.616	1.513	1.230
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1)})$	0.142	0.104	0.031	0.099	0.018	0.040	0.018	0.026
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1.5)})$	0.111	0.133	0.036	0.075	0.052	0.028	0.074	0.080
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(2)})$	0.092	0.113	0.038	0.058	0.067	0.043	0.069	0.115
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(4)})$	0.074	0.179	0.024	0.111	0.059	0.077	0.041	0.105
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(6)})$	0.061	0.208	0.044	0.039	0.073	0.120	0.089	0.081
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(8)})$	0.056	0.193	0.082	0.061	0.079	0.115	0.080	0.064

Tableau IV.1 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M \leq 5.7, R \approx 20	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.937	1.178	1.008	1.102	0.897	1.033	0.969	0.997
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.988	1.259	0.996	1.127	0.995	1.007	0.984	1.060
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.977	1.310	0.973	1.161	0.922	1.003	1.073	1.096
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.991	1.299	1.241	1.447	0.895	0.949	1.097	1.094
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.983	1.243	1.133	1.201	0.987	1.008	1.086	1.097
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	1.023	1.177	1.041	1.093	1.057	1.000	1.050	1.075
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.144	0.192	0.162	0.235	0.070	0.047	0.043	0.046
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.146	0.151	0.173	0.209	0.063	0.066	0.062	0.060
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.111	0.204	0.132	0.130	0.116	0.090	0.038	0.012
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.100	0.309	0.202	0.352	0.077	0.077	0.004	0.006
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.105	0.326	0.183	0.189	0.036	0.046	0.005	0.005
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.120	0.238	0.194	0.105	0.057	0.032	0.007	0.008
	$\bar{\rho}_V^{(1)}$	1.509	0.798	0.697	0.514	0.694	0.855	0.745	0.720
	$\bar{\rho}_V^{(1.5)}$	1.543	0.814	0.642	0.513	0.802	0.824	0.741	0.817
	$\bar{\rho}_V^{(2)}$	1.404	0.852	0.619	0.527	0.772	0.837	0.930	0.886
	$\bar{\rho}_V^{(4)}$	1.279	0.876	0.803	0.716	0.710	0.857	0.882	0.850
	$\bar{\rho}_V^{(6)}$	1.228	0.835	0.954	0.942	0.959	0.938	0.862	0.876
	$\bar{\rho}_V^{(8)}$	1.169	0.875	0.945	1.011	1.152	0.941	0.871	0.894
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1)})$	0.506	0.184	0.146	0.076	0.225	0.075	0.051	0.050
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1.5)})$	0.353	0.112	0.105	0.103	0.314	0.055	0.070	0.098
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(2)})$	0.388	0.143	0.057	0.067	0.275	0.106	0.040	0.020
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(4)})$	0.307	0.175	0.139	0.102	0.095	0.097	0.023	0.009
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(6)})$	0.311	0.209	0.122	0.063	0.099	0.022	0.012	0.007
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(8)})$	0.299	0.200	0.041	0.087	0.204	0.022	0.015	0.008

Tableau IV.1 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M > 5.7, R \approx 5	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.565	0.669	1.139	1.395	1.653	2.219	2.795	2.031
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.571	0.689	1.256	1.624	1.838	2.567	2.486	2.006
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.570	0.745	1.244	1.631	1.799	2.585	1.787	1.912
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.558	0.760	1.281	1.198	1.688	1.976	1.624	1.619
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.551	0.640	1.223	1.352	1.586	1.904	1.750	1.920
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.549	0.662	1.268	1.430	1.571	1.876	1.760	1.963
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.122	0.268	0.189	0.342	0.518	1.158	0.555	0.205
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.119	0.291	0.204	0.257	0.449	1.349	0.706	0.172
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.112	0.322	0.198	0.440	0.288	1.115	0.135	0.102
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.069	0.310	0.295	0.349	0.110	0.180	0.171	0.136
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.059	0.139	0.123	0.344	0.215	0.257	0.039	0.047
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.056	0.144	0.104	0.298	0.336	0.307	0.056	0.045
	$\bar{\rho}_V^{(1)}$	0.806	0.733	1.835	1.880	1.594	1.514	1.537	1.681
	$\bar{\rho}_V^{(1.5)}$	0.754	0.896	2.079	1.806	1.622	1.871	1.227	1.619
	$\bar{\rho}_V^{(2)}$	0.726	0.936	1.677	1.689	1.615	1.651	1.220	1.497
	$\bar{\rho}_V^{(4)}$	0.656	1.011	1.598	1.734	1.817	1.771	1.188	1.262
	$\bar{\rho}_V^{(6)}$	0.630	1.040	1.423	1.713	1.798	1.746	1.336	1.297
	$\bar{\rho}_V^{(8)}$	0.602	1.005	1.351	1.561	1.719	1.681	1.338	1.343
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1)})$	0.159	0.265	0.305	0.371	0.522	0.540	0.215	0.275
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1.5)})$	0.121	0.416	0.275	0.453	0.274	0.859	0.167	0.295
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(2)})$	0.132	0.464	0.402	0.458	0.440	0.319	0.202	0.163
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(4)})$	0.177	0.516	0.523	0.770	0.195	0.178	0.163	0.109
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(6)})$	0.178	0.475	0.218	0.532	0.214	0.196	0.050	0.034
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(8)})$	0.179	0.419	0.072	0.225	0.256	0.174	0.030	0.023

Tableau IV.1 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M > 5.7, R \approx 20	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	1.008	1.079	1.366	1.072	1.324	1.212	1.137	0.985
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	1.039	1.156	1.672	1.149	1.101	1.485	1.523	1.287
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	1.040	1.226	1.602	1.285	1.166	1.615	1.579	1.446
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	1.057	1.288	1.267	1.177	1.369	1.737	1.793	1.623
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	1.087	1.349	1.240	1.049	1.642	1.884	1.662	1.416
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	1.091	1.311	1.289	1.152	1.955	1.865	1.504	1.339
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.197	0.237	0.155	0.128	0.353	0.255	0.144	0.199
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.208	0.253	0.191	0.211	0.227	0.247	0.298	0.020
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.209	0.338	0.275	0.339	0.202	0.414	0.355	0.012
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.289	0.326	0.231	0.304	0.380	0.440	0.149	0.035
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.287	0.348	0.163	0.208	0.412	0.181	0.153	0.042
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.233	0.349	0.185	0.231	0.398	0.104	0.177	0.023
	$\bar{\rho}_V^{(1)}$	0.704	1.064	1.643	1.167	1.449	1.664	1.528	1.366
	$\bar{\rho}_V^{(1.5)}$	0.728	1.239	1.914	1.120	1.285	2.206	2.293	1.807
	$\bar{\rho}_V^{(2)}$	0.723	1.355	1.782	1.277	1.459	2.572	2.742	1.948
	$\bar{\rho}_V^{(4)}$	0.734	1.297	1.540	1.436	1.867	2.950	3.095	2.340
	$\bar{\rho}_V^{(6)}$	0.778	1.328	1.667	1.496	2.281	3.322	3.018	2.146
	$\bar{\rho}_V^{(8)}$	0.812	1.327	1.746	1.729	2.797	2.941	2.996	1.840
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1)})$	0.208	0.233	0.265	0.234	0.449	0.182	0.183	0.210
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1.5)})$	0.198	0.339	0.219	0.172	0.280	0.697	0.692	0.061
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(2)})$	0.215	0.403	0.196	0.176	0.288	0.807	0.838	0.103
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(4)})$	0.245	0.368	0.223	0.192	0.485	1.043	0.312	0.284
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(6)})$	0.254	0.398	0.267	0.171	0.634	1.363	0.246	0.569
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(8)})$	0.213	0.336	0.296	0.257	0.519	1.243	0.227	0.857

Tableau IV.1 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M > 5.7, R \approx 50	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.812	0.646	0.500	0.625	0.768	0.669	0.784	0.898
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.769	0.629	0.559	0.546	0.725	0.695	0.806	0.903
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.770	0.664	0.577	0.501	0.747	0.764	0.864	0.919
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.830	0.644	0.527	0.600	0.705	0.790	0.961	0.986
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.797	0.573	0.570	0.746	0.809	0.805	1.014	1.046
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.805	0.536	0.588	0.745	0.923	0.857	1.062	1.142
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.121	0.212	0.045	0.125	0.168	0.063	0.073	0.030
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.108	0.174	0.050	0.062	0.141	0.061	0.072	0.010
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.087	0.185	0.084	0.063	0.114	0.045	0.037	0.023
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.122	0.127	0.099	0.116	0.111	0.043	0.065	0.021
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.096	0.153	0.139	0.136	0.143	0.036	0.054	0.026
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.113	0.139	0.142	0.121	0.112	0.021	0.050	0.088
	$\bar{\rho}_V^{(1)}$	0.511	0.685	0.463	0.513	0.642	0.771	0.899	1.076
	$\bar{\rho}_V^{(1.5)}$	0.524	0.590	0.517	0.461	0.609	0.811	0.955	1.110
	$\bar{\rho}_V^{(2)}$	0.549	0.554	0.541	0.419	0.651	0.871	1.040	1.128
	$\bar{\rho}_V^{(4)}$	0.582	0.505	0.539	0.542	0.736	0.890	1.188	1.226
	$\bar{\rho}_V^{(6)}$	0.568	0.478	0.546	0.768	0.811	0.946	1.276	1.321
	$\bar{\rho}_V^{(8)}$	0.537	0.432	0.680	0.946	0.927	1.014	1.367	1.482
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1)})$	0.076	0.243	0.031	0.122	0.066	0.109	0.131	0.030
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1.5)})$	0.076	0.144	0.101	0.077	0.059	0.091	0.100	0.024
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(2)})$	0.080	0.139	0.113	0.100	0.072	0.054	0.075	0.029
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(4)})$	0.096	0.088	0.129	0.114	0.072	0.069	0.106	0.038
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(6)})$	0.103	0.106	0.060	0.112	0.100	0.045	0.094	0.052
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(8)})$	0.078	0.098	0.063	0.143	0.096	0.041	0.078	0.156

Tableau IV.1 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M > 5.7, R \approx 90	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.741	0.991	0.777	0.762	0.731	0.854	0.688	0.621
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.765	0.870	0.843	0.767	0.774	0.865	0.743	0.633
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.781	0.852	0.942	0.843	0.831	0.895	0.770	0.671
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.800	0.928	1.026	1.087	0.988	1.026	0.752	0.862
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.794	0.947	1.032	0.937	1.057	1.050	0.861	0.983
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.819	0.985	0.861	0.749	1.035	1.049	0.926	1.070
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.062	0.192	0.051	0.096	0.110	0.119	0.054	0.067
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.078	0.121	0.105	0.057	0.090	0.097	0.044	0.066
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.090	0.091	0.121	0.090	0.088	0.076	0.039	0.053
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.083	0.164	0.254	0.291	0.209	0.124	0.028	0.039
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.092	0.126	0.103	0.207	0.273	0.149	0.029	0.026
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.106	0.183	0.069	0.072	0.241	0.064	0.014	0.053
	$\bar{\rho}_V^{(1)}$	1.176	0.997	0.672	0.603	0.551	0.660	0.653	0.662
	$\bar{\rho}_V^{(1.5)}$	1.140	0.965	0.631	0.588	0.571	0.655	0.649	0.658
	$\bar{\rho}_V^{(2)}$	1.117	0.887	0.584	0.615	0.596	0.665	0.660	0.648
	$\bar{\rho}_V^{(4)}$	1.063	0.918	0.801	0.738	0.694	0.721	0.645	0.677
	$\bar{\rho}_V^{(6)}$	1.027	0.876	0.884	0.818	0.760	0.731	0.644	0.726
	$\bar{\rho}_V^{(8)}$	1.016	0.912	0.762	0.756	0.733	0.711	0.643	0.727
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1)})$	0.325	0.116	0.085	0.029	0.049	0.045	0.057	0.081
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1.5)})$	0.245	0.102	0.125	0.065	0.039	0.041	0.049	0.081
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(2)})$	0.199	0.194	0.048	0.063	0.052	0.049	0.043	0.068
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(4)})$	0.157	0.155	0.121	0.177	0.102	0.057	0.033	0.035
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(6)})$	0.156	0.127	0.048	0.094	0.083	0.097	0.013	0.044
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(8)})$	0.146	0.160	0.065	0.040	0.089	0.083	0.011	0.040

Tableau IV.1 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Est (suite).

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M > 5.7, R > 90	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.760	0.851	0.806	0.753	0.899	0.982	1.000	1.028
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.743	0.823	0.808	0.792	0.892	0.932	1.053	1.072
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.728	0.773	0.784	0.832	0.967	0.899	1.092	1.079
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.697	0.762	0.858	0.916	0.809	0.817	0.983	0.959
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.686	0.761	0.995	0.960	0.843	0.831	0.919	0.925
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.685	0.775	1.017	0.990	0.859	0.817	0.928	0.939
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.042	0.101	0.069	0.047	0.061	0.033	0.043	0.058
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.047	0.107	0.079	0.072	0.079	0.057	0.037	0.045
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.038	0.109	0.048	0.089	0.104	0.073	0.043	0.061
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.033	0.073	0.073	0.084	0.070	0.162	0.029	0.028
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.033	0.067	0.172	0.073	0.042	0.134	0.036	0.010
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.034	0.075	0.054	0.121	0.077	0.109	0.029	0.006
	$\bar{\rho}_V^{(1)}$	0.455	0.484	0.768	0.837	0.661	0.683	0.756	0.793
	$\bar{\rho}_V^{(1.5)}$	0.436	0.452	0.725	0.821	0.683	0.653	0.771	0.818
	$\bar{\rho}_V^{(2)}$	0.425	0.454	0.714	0.746	0.709	0.636	0.788	0.823
	$\bar{\rho}_V^{(4)}$	0.416	0.488	0.663	0.647	0.635	0.631	0.778	0.794
	$\bar{\rho}_V^{(6)}$	0.412	0.491	0.570	0.705	0.597	0.702	0.802	0.808
	$\bar{\rho}_V^{(8)}$	0.412	0.463	0.542	0.720	0.625	0.740	0.807	0.821
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1)})$	0.055	0.156	0.029	0.032	0.106	0.047	0.036	0.051
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1.5)})$	0.055	0.120	0.044	0.062	0.115	0.047	0.036	0.061
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(2)})$	0.047	0.103	0.077	0.057	0.074	0.051	0.038	0.066
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(4)})$	0.020	0.096	0.026	0.030	0.068	0.098	0.045	0.026
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(6)})$	0.018	0.075	0.063	0.072	0.094	0.072	0.048	0.019
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(8)})$	0.020	0.046	0.073	0.085	0.097	0.073	0.029	0.016

Tableau IV.2 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Ouest.

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M \leq 6.8, R \approx 10	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.649	0.702	0.654	0.746	0.640	0.619	1.050	0.772
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.635	0.729	0.791	0.721	0.557	0.610	0.824	0.871
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.633	0.696	0.693	0.742	0.587	0.664	0.713	0.843
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.647	0.554	0.633	0.716	0.570	0.542	0.593	0.735
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.657	0.535	0.609	0.635	0.552	0.606	0.541	0.761
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.675	0.547	0.533	0.548	0.564	0.602	0.589	0.809
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.035	0.131	0.109	0.071	0.169	0.099	0.086	0.076
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.023	0.097	0.224	0.126	0.123	0.116	0.089	0.071
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.015	0.154	0.076	0.155	0.079	0.134	0.089	0.079
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.024	0.149	0.218	0.101	0.081	0.105	0.075	0.085
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.031	0.162	0.135	0.066	0.081	0.082	0.014	0.099
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.045	0.160	0.042	0.038	0.087	0.067	0.025	0.020
	$\bar{\rho}_V^{(1)}$	0.443	0.282	0.180	0.473	0.285	0.504	0.460	0.371
	$\bar{\rho}_V^{(1.5)}$	0.391	0.235	0.208	0.388	0.249	0.424	0.428	0.442
	$\bar{\rho}_V^{(2)}$	0.365	0.232	0.222	0.412	0.305	0.357	0.452	0.460
	$\bar{\rho}_V^{(4)}$	0.314	0.213	0.328	0.329	0.310	0.242	0.471	0.526
	$\bar{\rho}_V^{(6)}$	0.304	0.204	0.379	0.299	0.272	0.198	0.377	0.570
	$\bar{\rho}_V^{(8)}$	0.301	0.209	0.330	0.286	0.268	0.182	0.291	0.399
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1)})$	0.091	0.135	0.050	0.145	0.106	0.082	0.037	0.071
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1.5)})$	0.060	0.097	0.074	0.100	0.044	0.099	0.068	0.063
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(2)})$	0.044	0.083	0.021	0.082	0.062	0.118	0.066	0.035
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(4)})$	0.020	0.074	0.112	0.076	0.051	0.076	0.063	0.013
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(6)})$	0.019	0.073	0.111	0.050	0.023	0.023	0.153	0.099
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(8)})$	0.019	0.063	0.069	0.024	0.015	0.027	0.086	0.118

Tableau IV.2 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Ouest (suite).

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M \leq 6.8, R \approx 20	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.923	0.662	0.928	0.793	0.937	0.874	0.874	0.847
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.896	0.671	0.806	0.823	0.873	0.861	0.958	0.979
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.875	0.706	0.736	0.853	0.830	0.880	0.993	1.123
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.814	0.771	0.719	0.959	0.736	0.785	0.752	0.665
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.800	0.842	0.704	0.806	0.700	0.749	0.654	0.697
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.801	0.871	0.715	0.965	0.770	0.708	0.583	0.710
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.106	0.147	0.108	0.187	0.149	0.191	0.065	0.041
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.107	0.139	0.066	0.118	0.102	0.151	0.065	0.113
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.100	0.148	0.071	0.110	0.129	0.145	0.134	0.077
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.063	0.127	0.134	0.145	0.096	0.088	0.100	0.076
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.042	0.219	0.089	0.121	0.076	0.122	0.053	0.041
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.055	0.195	0.069	0.270	0.196	0.155	0.018	0.063
	$\bar{\rho}_V^{(1)}$	0.859	0.246	0.241	0.282	0.268	0.311	0.411	0.333
	$\bar{\rho}_V^{(1.5)}$	0.730	0.248	0.229	0.278	0.273	0.296	0.435	0.382
	$\bar{\rho}_V^{(2)}$	0.666	0.252	0.233	0.285	0.271	0.343	0.538	0.468
	$\bar{\rho}_V^{(4)}$	0.515	0.256	0.273	0.303	0.213	0.281	0.308	0.359
	$\bar{\rho}_V^{(6)}$	0.456	0.271	0.256	0.307	0.191	0.237	0.274	0.328
	$\bar{\rho}_V^{(8)}$	0.432	0.273	0.251	0.332	0.207	0.231	0.285	0.338
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1)})$	0.302	0.112	0.019	0.061	0.033	0.054	0.037	0.036
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1.5)})$	0.219	0.095	0.021	0.025	0.047	0.055	0.059	0.064
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(2)})$	0.167	0.080	0.019	0.037	0.068	0.046	0.080	0.047
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(4)})$	0.075	0.071	0.035	0.040	0.037	0.042	0.041	0.013
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(6)})$	0.035	0.075	0.025	0.064	0.019	0.021	0.017	0.015
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(8)})$	0.023	0.067	0.021	0.075	0.046	0.029	0.017	0.013

Tableau IV.2 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes historiques de l'Ouest (suite).

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M > 6.8, R \approx 10	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.767	0.717	0.616	0.673	0.629	0.808	1.442	1.285
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.745	0.711	0.671	0.704	0.639	0.931	1.475	1.386
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.729	0.721	0.708	0.691	0.681	1.080	1.684	1.354
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.680	0.724	0.843	0.795	0.735	1.337	1.456	1.125
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.620	0.775	0.714	0.813	0.976	1.373	1.322	1.106
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.595	0.740	0.652	0.790	1.090	1.316	1.331	1.196
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.086	0.110	0.085	0.148	0.111	0.134	0.305	0.104
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.062	0.074	0.126	0.111	0.072	0.107	0.298	0.259
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.046	0.106	0.063	0.070	0.069	0.104	0.199	0.225
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.050	0.144	0.061	0.160	0.112	0.167	0.181	0.048
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.072	0.168	0.116	0.132	0.228	0.250	0.068	0.045
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.061	0.158	0.066	0.065	0.262	0.263	0.060	0.050
	$\bar{\rho}_V^{(1)}$	0.735	0.371	0.195	0.211	0.210	0.466	0.764	0.816
	$\bar{\rho}_V^{(1.5)}$	0.655	0.355	0.219	0.199	0.226	0.507	0.770	0.791
	$\bar{\rho}_V^{(2)}$	0.595	0.341	0.221	0.196	0.224	0.462	0.765	0.777
	$\bar{\rho}_V^{(4)}$	0.481	0.281	0.229	0.223	0.261	0.492	0.788	0.739
	$\bar{\rho}_V^{(6)}$	0.441	0.274	0.211	0.236	0.290	0.558	0.869	0.776
	$\bar{\rho}_V^{(8)}$	0.417	0.272	0.229	0.240	0.315	0.612	0.922	0.803
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1)})$	0.120	0.121	0.022	0.027	0.025	0.128	0.124	0.057
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(1.5)})$	0.088	0.109	0.033	0.019	0.031	0.115	0.166	0.051
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(2)})$	0.069	0.081	0.051	0.023	0.055	0.078	0.071	0.095
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(4)})$	0.068	0.052	0.012	0.017	0.064	0.065	0.081	0.084
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(6)})$	0.062	0.065	0.004	0.019	0.068	0.073	0.082	0.067
	$\sigma(\bar{\rho}_V^{(8)})$	0.058	0.055	0.021	0.009	0.068	0.084	0.076	0.083

Tableau IV.3 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes synthétiques de l'Est.

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M = 6, R = 30	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.965	0.825	0.783	0.964	1.390	1.273	1.228	1.275
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.954	0.846	0.829	0.862	1.350	1.129	1.208	1.145
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.952	0.865	0.930	0.935	1.319	1.208	1.296	1.147
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.913	0.826	0.912	0.943	1.200	1.220	1.251	1.057
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.862	0.807	0.898	0.868	1.050	1.089	1.121	1.021
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.825	0.821	0.904	0.844	0.925	1.047	1.037	1.004
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.046	0.111	0.059	0.111	0.106	0.049	0.118	0.119
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.048	0.092	0.060	0.080	0.068	0.065	0.180	0.129
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.046	0.100	0.066	0.045	0.117	0.083	0.170	0.169
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.034	0.064	0.058	0.052	0.063	0.061	0.392	0.244
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.036	0.078	0.116	0.062	0.054	0.057	0.222	0.085
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.039	0.080	0.083	0.071	0.100	0.082	0.132	0.156
M = 6, R = 50	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.979	1.033	1.040	0.879	0.820	1.017	1.069	1.231
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	1.004	1.006	1.056	0.948	0.894	0.986	1.080	1.271
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	1.002	0.985	1.011	0.992	0.949	1.041	1.309	1.372
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.981	1.027	0.934	0.937	0.980	1.366	1.389	1.150
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.952	1.017	0.927	0.904	1.024	1.631	1.483	1.204
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.946	0.965	0.813	0.913	1.057	1.806	1.436	1.134
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.087	0.167	0.043	0.042	0.059	0.074	0.044	0.029
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.068	0.098	0.092	0.052	0.159	0.062	0.131	0.040
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.074	0.110	0.080	0.065	0.157	0.159	0.051	0.044
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.077	0.106	0.067	0.079	0.085	0.168	0.098	0.046
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.078	0.092	0.076	0.084	0.093	0.139	0.087	0.067
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.082	0.107	0.047	0.071	0.151	0.138	0.116	0.075

Tableau IV.3 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes synthétiques de l'Est (suite).

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M = 7, R = 20	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.968	0.951	1.129	0.959	0.884	1.078	1.273	0.799
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.966	0.928	1.033	0.962	0.882	1.056	1.218	0.795
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.971	0.898	0.992	0.998	0.887	0.976	1.108	0.830
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.959	0.905	0.925	1.018	1.022	0.999	1.154	1.058
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.945	0.950	0.934	1.131	1.061	1.011	1.014	0.859
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.935	0.972	0.973	1.162	1.091	1.022	0.892	0.796
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.075	0.082	0.053	0.275	0.112	0.112	0.126	0.111
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.053	0.099	0.098	0.222	0.084	0.122	0.075	0.137
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.049	0.085	0.083	0.115	0.075	0.067	0.054	0.046
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.059	0.080	0.069	0.030	0.072	0.070	0.023	0.075
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.069	0.083	0.055	0.061	0.074	0.029	0.016	0.018
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.071	0.070	0.059	0.063	0.068	0.025	0.025	0.019
M = 7, R = 70	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.980	0.912	0.889	0.928	1.182	0.907	1.128	1.287
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.975	0.895	0.892	0.903	1.086	0.860	1.071	1.229
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.973	0.900	0.886	0.953	1.056	0.817	1.079	1.265
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.990	0.915	0.972	0.976	0.985	0.840	1.089	1.284
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	1.007	0.923	0.976	0.985	0.820	0.910	1.210	1.208
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	1.031	0.953	0.987	1.024	0.771	0.994	1.251	1.246
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.057	0.067	0.067	0.091	0.150	0.071	0.066	0.030
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.053	0.072	0.052	0.043	0.156	0.071	0.112	0.097
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.056	0.076	0.080	0.051	0.116	0.071	0.156	0.087
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.056	0.080	0.084	0.068	0.076	0.193	0.122	0.014
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.069	0.074	0.038	0.110	0.106	0.173	0.050	0.042
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.082	0.087	0.045	0.138	0.135	0.141	0.040	0.050

Tableau IV.4 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes synthétiques de l'Ouest.

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M = 6.5, R = 30	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.938	0.913	0.812	0.590	1.021	0.951	0.903	0.682
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.933	0.895	0.831	0.605	1.060	0.958	0.910	0.688
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.927	0.863	0.821	0.721	0.996	0.965	0.825	0.723
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.860	0.772	0.781	0.778	1.033	0.957	0.875	0.838
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.826	0.760	0.788	0.827	1.041	0.962	0.850	0.834
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.810	0.762	0.802	0.852	1.012	0.892	0.821	0.805
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.055	0.105	0.174	0.083	0.093	0.059	0.088	0.039
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.065	0.087	0.078	0.092	0.117	0.032	0.034	0.072
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.075	0.071	0.048	0.071	0.062	0.073	0.065	0.014
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.050	0.079	0.029	0.037	0.069	0.139	0.030	0.012
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.036	0.058	0.034	0.073	0.030	0.078	0.009	0.008
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.033	0.045	0.034	0.082	0.033	0.046	0.007	0.003
M = 6.5, R = 50	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.886	0.921	1.105	0.817	0.660	0.743	0.988	0.867
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.885	0.989	1.039	0.797	0.611	0.866	0.904	0.792
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.884	1.029	0.984	0.778	0.638	0.839	0.729	0.743
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.863	0.981	0.850	0.806	0.760	0.923	0.759	0.706
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.853	0.942	0.817	0.804	0.755	0.947	0.744	0.721
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.850	0.920	0.813	0.792	0.747	0.914	0.735	0.732
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.075	0.067	0.042	0.123	0.044	0.149	0.025	0.064
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.079	0.058	0.035	0.077	0.057	0.179	0.018	0.044
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.077	0.078	0.136	0.042	0.050	0.081	0.019	0.012
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.049	0.078	0.087	0.011	0.036	0.059	0.032	0.005
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.035	0.051	0.056	0.015	0.048	0.070	0.029	0.008
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.029	0.049	0.054	0.014	0.055	0.058	0.021	0.009

Tableau IV.4 RASIH et RASIV basiques des groupements de séismes synthétiques de l'Ouest (suite).

Groupement	$\bar{\rho}_i^{(\mu)}$ et	Période Propre (T)							
	$\sigma(\bar{\rho}_i^{(\mu)})$	< 0.1	0.1-0.4	0.4-0.6	0.6-1	1-2	2-4	4-6	> 6
M = 7.2, R = 70	$\bar{\rho}_H^{(1)}$	0.987	0.924	0.979	0.902	0.817	0.819	0.988	1.270
	$\bar{\rho}_H^{(1.5)}$	0.976	0.942	0.912	0.839	0.780	0.849	0.972	1.306
	$\bar{\rho}_H^{(2)}$	0.972	0.956	0.898	0.844	0.735	0.876	0.972	1.442
	$\bar{\rho}_H^{(4)}$	0.960	1.029	0.907	0.879	0.835	0.876	1.324	1.730
	$\bar{\rho}_H^{(6)}$	0.952	1.030	0.945	0.858	0.817	0.952	1.431	1.884
	$\bar{\rho}_H^{(8)}$	0.945	1.000	0.896	0.823	0.896	1.060	1.348	1.671
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1)})$	0.046	0.111	0.059	0.111	0.106	0.049	0.118	0.119
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(1.5)})$	0.048	0.092	0.060	0.080	0.068	0.065	0.180	0.129
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(2)})$	0.046	0.100	0.066	0.045	0.117	0.083	0.170	0.169
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(4)})$	0.034	0.064	0.058	0.052	0.063	0.061	0.392	0.244
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(6)})$	0.036	0.078	0.116	0.062	0.054	0.057	0.222	0.085
	$\sigma(\bar{\rho}_H^{(8)})$	0.039	0.080	0.083	0.071	0.100	0.082	0.132	0.156